

Calibratge d'OpenTrack per la línia Barcelona-Vallès.

Treball realitzat per:

Pau Romero Carol

Dirigit per:

Prof. Andrés López Pita

Lydia Alonso Martínez

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, juny de 2018

Departament d'infraestructura del Transport i del Territori

TREBALL FINAL DE GRAU

Agraïments

Agrair a FGC i al personal de l'oficina tècnica pel suport rebut durant la realització d'aquest projecte.

A la Lydia Alonso per tot el coneixement transmès i sobretot per la seva paciència.

Al professor Andrés López Pita, per tots els consells de valor inestimable.

A en Giorgio Medeossi, per l'ajuda prestada com a expert en OpenTrack.

A l'Ana, el Jordi i la Sandra, per les hores que els hi he robat i al Dani, per no tenir cap problema en arribar on no he pogut.

I finalment a la meva família pel seu suport i estima incondicional des de 1994.

Resum

La línia Barcelona-Vallès, operada per Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC), afronta nous reptes de futur amb una oferta al límit de la capacitat de la línia i una demanda creixent any rere any.

L'estudi previ del present projecte aborda aquesta dicotomia i introdueix el calculador de marxés tècniques, model virtual de la infraestructura, servei i material rodant, capaç de simular els temps mínims de recorregut entre dos punts de la línia. Aquest calculador esdevindrà una eina de suport a la planificació de futures inversions estratègiques en la línia.

Un cop introduïts els atributs de la línia des de l'òptica de la seva modelització amb OpenTrack, software de suport a la planificació ferroviària, es calibra el model virtual ajustant els paràmetres relatius a material rodant, tipus de conducció i infraestructura, amb l'objectiu d'obtenir temps de recorregut simulats dins d'una tolerància fixada. Paral·lelament es construeix el marc de referència comparatiu a partir de mesures reals realitzades ex professo pel present estudi i en condicions determinades per tal d'aconseguir temps de recorregut mínims.

A partir dels resultats obtinguts del procés de calibratge s'extreuen les conclusions del mateix i es proposen recomanacions a l'Oficina Tècnica de FGC per futurs usos de l'eina elaborada.

Paraules clau: FGC, línia Barcelona-Vallès, OpenTrack, simulacions ferroviàries, calculador marxés tècniques, calibratge.

Abstract

Barcelona-Vallès railway line operated by Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC) is facing new challenges of future with an offer about to exceed the line capacity limit and an increasing demand year after year.

The preliminary study of the present project deals with that dichotomy and introduce the running time calculator (a virtual model of the infrastructure, service and rolling stock) which is able to simulate the minimum running times between two points of the line. This calculator will become a support tool for the future planning strategic investments in this commuter line.

Once the attributes of the line have been introduced in OpenTrack (a railway planning support software), the virtual model of the line could be calibrated by using the parameters related to the rolling stock, driving and infrastructure. The main objective of this procedure is to obtain simulated time results within a fixed tolerance. In parallel it has been built a comparative framework with the real running times calculated specifically for this project and developed with determined boundary conditions. The purpose of that is to obtain the real minimum running times.

According to the obtained results during the calibrating process, some conclusions will be extracted and some recommendations for the Technical Office of FGC will be elaborated for the eventual future uses of this tool.

Key words: FGC, Barcelona-Vallès railway line, OpenTrack, railway simulations, running time estimator, calibrating.

Índex

Resum.....	3
Abstract	4
1. Preàmbul	11
1.1 Introducció	11
1.2 Abast i objectius	12
1.3 Metodologia	13
1.4 Diagrama de treball.....	14
2. Context de l'estudi	15
2.1 FGC	15
2.2 Introducció a la línia Barcelona-Vallès.	16
3. Aproximació al software OpenTrack.....	21
4. Modelització i mesures de referència	23
4.1 Especificacions infraestructurals.....	23
4.2 Especificacions del Material rodant.	32
4.3 Especificacions de la interacció de la infraestructura i del material rodant.	33
4.4 Paràmetres del calibratge.	33
4.5 Moviments i mesures de referència.....	35
4.6 Model final.	43
5. Resultats del calibratge	44
5.1 Metodologia	44
5.2 Procés iteratiu de calibratge	45
5.3 Discussió de resultats del procés iteratiu.....	62
5.4 Resultats de la simulació amb diferents polítiques d'aturades.	65
6. Conclusions i recomanacions	70
6.1 De caràcter general.	70
6.2 Específiques.....	71
Bibliografia	74
 Annex 1. Recull dels temps de recorregut reals obtinguts de les circulacions nocturnes.	76
Annex 2. Resultats del procés iteratiu, temps de recorregut i paràmetres utilitzats.	78

Taula de continguts

Figura 1.1 Trangle de planificació dels Ferrocarrils Nacionals Suïssos Font: Huerlimann i Andrew.	13
Figura 1.2 Versió final del pla de treball seguit en la realització del estudi. Font: Elaboració pròpia	14
Figura 2.1 Localització de les infraestructures gestionades per FGC. Font: trens.cat.	15
Figura 2.2 Localització de l' infraestructura línia Barcelona-Vallès. Font: FGC.	16
Figura 2.3 Actuals serveis de la línia Barcelona-Vallès (Febrer 2018). Font: FGC.	17
Taula 2.1 Temps de recorregut entre les estacions origen de línia. Font: FGC i elaboració pròpia.	19
Figura 3.1 Mostra d'operadors i fabricants que consten entre els clients d'OpenTrack. Font: Opentrack.ch.	21
Figura 3.2 Esquematzació del funcionament d'OpenTrack. Font: Opentrack.ch.	21
Figura 4.1 Esquematzació de la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès. Font: FGC.....	23
Figura 4.2 Perfil i traçat del tram Plaça Catalunya - Provença. Font: FGC.	25
Figura 4.3 Configuració d'entrades i sortides a Plaça Catalunya. Font: Elaboració pròpia.....	28
Figura 4.4 Configuració d'agulles i itineraris a Gràcia. Font: Elaboració pròpia.....	28
Figura 4.5 Configuració d'agulles i itineraris a Sant Cugat. Font: Elaboració pròpia.	28
Figura 4.6 Principals senyals fixes convencionals de la línia BV. Font: FGC.....	29
Figura 4.7 Estats dels senyals fixes lluminoses de la línia BV. Font: Viquipèdia	29
Figura 4.8 Codis de velocitats de la línia Barcelona-Vallès. Font: FGC i elaboració pròpia.....	30
Figura 4.9 Corba de potència de la UT113. Font: Siemens.	32
Figura 4.10 Corba de potència de la UT114. Font: Siemens.	32
Figura 4.11 Corba frenada d'entrada a Sant Cugat ascendent. Font: elaboració pròpia.....	38
Figura 4.12 Corba espai-velocitat entre les estacions de Baixador de Vallvidrera i Peu del Funicular en sentit descendent. Font: elaboració pròpia.	39
Figura 4.13 Fragment del model virtual de la línia Barcelona-Vallès generat amb OpenTrack. Font: elaboració pròpia.	43
Taula 4.1 Característiques bàsiques de la infraestructura. Font: FGC i elaboració pròpia.	27
Taula 4.2 Característiques UT113. Font: Siemens, CAF i elaboració pròpia.	32
Taula 4.3 Característiques UT114. Font: Siemens, CAF i elaboració pròpia.	32
Taula 4.4 Paràmetres potencialment calibrables. Font: Elaboració pròpia.....	33
Taula 4.5 Moviments pel tram Plaça Catalunya - Sant Cugat en sentit ascendent. Font: FGC...	36

Taula 4.6 Moviments per la branca Av. Tibidabo en sentit ascendent Font: FGC.	36
Taula 4.7 Moviments pel tram Valldoreix – Parc del Nord ascendent. Font: FGC.....	36
Taula 4.8 Moviments pel tram Valldoreix – Nacions Unides. Font: FGC.....	36
Taula 4.9 Moviments pel tram Sant Cugat – Plaça Catalunya en sentit descendent. Font: FGC.	37
Taula 4.10 Moviments per la branca Av. Tibidabo en sentit descendent. Font: FGC.....	37
Taula 4.11 Moviments pel tram Parc del Nord – Valldoreix en sentit descendent. Font: FGC.	37
Taula 4.12 Moviments pel tram Nacions Unides - Valldoreix en sentit descendent. Font: FGC.	37
Taula 4.13 Abstracte de la taula 4.15 amb els temps de recorregut dels moviments estudiats. Font: FGC i elaboració pròpia.....	38
Taula 4.14 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya - Sarrià , sentit ascendent. Font: FGC.....	40
Taula 4.15 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya - Sarrià , sentit descendent. Font: FGC.....	40
Taula 4.16 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Av. Tibidabo , sentit ascendent. Font: FGC.	40
Taula 4.17 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Av. Tibidabo , sentit descendent. Font: FGC.	40
Taula 4.18 Temps de recorregut tècnics pel tram Sarrià – Sant Cugat , sentit ascendent. Font: FGC. 41	
Taula 4.19 Temps de recorregut tècnics pel tram Sarrià – Sant Cugat , sentit descendent. Font: FGC. 41	
Taula 4.20 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Nacions Unides , sentit ascendent. Font: FGC.	41
Taula 4.21 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Nacions Unides , sentit descendent. Font: FGC.	41
Taula 4.22 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Sabadell-Nord , sentit ascendent. Font: FGC.	42
Taula 4.23 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Sabadell Nord , sentit descendent. Font: FGC.	42
 Figura 5.1 Esquema del procés iteratiu de calibratge. Font: elaboració pròpia.	44
Figura 5.2 Gràfic espai-velocitat pel tram TB-PM descendent. Font: elaboració pròpia.	63
Figura 5.3 Gràfic temps-recorregut tram EP-PD descendent. Font: elaboració pròpia.	64
Figura 5.4 Gràfic temps-recorregut tram PD-PM descendent. Font: elaboració pròpia.	64
Figura 5.5 Gràfic espai-velocitat en el tram Universitat Autònoma – Can Feu Gràcia, en el cas de no aturar-se a Sant Quirze.. Font: elaboració pròpia.....	69

Taula 5.1 Temps de recorregut TB-PC descendent. Font: elaboració pròpia.	63
Taula 5.2 Temps de recorregut tram PC-SR ascendent, sense parada a SG, BN i TT. Font: elaboració pròpia.	65
Taula 5.3 Temps de recorregut tram PC-SR descendent, sense parada a SG, BN i TT. Font: elaboració pròpia.	65
Taula 5.4 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent,... directe entre SR i SC. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.5 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, directe entre SR i SC. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.6 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, sense parada a les estacions de PF i VL. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.7 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, sense parada a les estacions de PF i VL. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.8 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, directe entre SR i VD. Font: elaboració pròpia	66
Taula 5.9 Temps de recorregut tram SR-SC descendent,. directe entre SR i VD. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.10 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, sense parada a les estacions de PF, VL i LP. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.11 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, sense parada a les estacions de PF, VL i LP. Font: elaboració pròpia.	66
Taula 5.12 Temps de recorregut tram SC-NAC ascendent, sense parada a les estacions de MS, HG i FN. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.13 Temps de recorregut tram SC-NC descendent, sense parada a les estacions de MS, HG i FN. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.14 Temps de recorregut tram SC-NA ascendent, .67 sense parada a les estacions de MS i FN. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.15 Temps de recorregut tram SC-NA descendent,67 sense parada a les estacions de MS i FN. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.16 Temps de recorregut tram SC-NO ascendent, sense parada a les estacions de BT, SQ i CF. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.17 Temps de recorregut tram SC-PN descendent, sense parada a les estacions de BT, SQ i CF. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.18 Temps de recorregut tram SC-NO ascendent, sense parada a les estacions de BT i SQ. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.19 Temps de recorregut tram SC-PN descendent, sense parada a les estacions de BT i SQ. Font: elaboració pròpia.	67
Taula 5.20 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent fora de la tolerància. .. Font: elaboració pròpia.	68
Taula 5.21 Temps de recorregut tram pel tram UA-CF/PJ amb diferent política d'aturades. Font: elaboració pròpia.	68

Taula A1.1 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Sant Cugat, sentit ascendent. Font: FGC.	76
Taula A1.5 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Plaça Catalunya, sentit descendent. Font: FGC.	77
Taula A2.1 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Font: elaboració pròpia.	79
Taula A2.2 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Tram PC-TB. Font: elaboració pròpia.	79
Taula A2.3 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Font: elaboració pròpia.	80
Taula A2.4 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit descendent. Tram PC-TB. Font: elaboració pròpia.	80
Taula A2.5 Paràmetres del calibratge referents a la infraestructura. Iteracions 0-5. Font: elaboració pròpia.	78
Taula A2.6 Paràmetres del calibratge referents al material rodant i conducció. Iteracions 0-5. Font: elaboració pròpia.	78
Taula A2.7 Paràmetres del calibratge referents a la infraestructura. Iteracions 6-10. Font: elaboració pròpia.	78
Taula A2.8 Paràmetres del calibratge referents al material rodant i conducció. Iteracions 6-10. Font: elaboració pròpia.	78

Abreviatures

PC	Plaça Catalunya
PR	Provença
GR	Gràcia
SG	Sant Gervasi
MN	Muntaner
BN	La Bonanova
TT	Les Tres Torres
SR	Sarrià
PF	Peu del Funicular
VL	Baixador de Vallvidrera
LP	Les Planes
LF	La Floresta
VD	Valldoreix
SC	Sant Cugat
VO	Volpelleres
SJ	Sant Joan
BT	Bellaterra
UN	Universitat Autònoma
SQ	Sant Quirze
CF	Can Feu - Gràcia
PJ	Sabadell Plaça Major
CT	La Creu Alta
NO	Sabadell Nord
PN	Sabadell Parc del Nord
MS	Mira-Sol
HG	Hospital General
RB	Rubí
FN	Les Fonts
TR	Terrassa Rambla
VP	Vallparadís Universitat
EN	Terrassa Estació del Nord
NA	Terrassa Nacions Unides

1. Preàmbul

1.1 Introducció

La línia Barcelona-Vallès (BV), gestionada i explotada per Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, és una de les infraestructures més importants, per volum d'usuaris, de l'àrea metropolitana de Barcelona. Es tracta d'una de les principals portes d'entrada a la ciutat des del Vallès i viceversa i exerceix una funció clau en la vertebració del territori que recorre, unint pols importants de l'àrea metropolitana com les ciutats de Terrassa i Sabadell o la Universitat Autònoma de Barcelona que representa un gran focus de demanda

Milers d'usuaris utilitzen aquesta infraestructura cada dia, motivats en gran mesura, per traslladar-se cap a la feina o centre d'estudi. Per tant, la línia Barcelona-Vallès ha d'atendre una demanda de tipus pendular, el que genera puntes d'ocupació molt elevades en moments concrets del dia. Per altra banda, aquesta demanda té una tendència creixent any rere any i es preveu que l'augment es vegi accentuada conseqüència de les recents ampliacions del traçat inaugurades a Terrassa i Sabadell. Les estimacions apunten creixements a mitjà termini fins a un 30% més d'usuaris per determinades estacions.

Actualment FGC explota la infraestructura al límit de la seva capacitat en hora punta del matí (7:30 h a 9:00 h), arribant a 32 trens comercials per hora i sentit en el tram Gràcia – Plaça Catalunya, el que implica un tren cada 1,50" de mitjana en aquesta franja, valor inferior a la freqüència més petita que ofereix TMB en el metro de Barcelona, 169 s. (TMB, 2018)

En hora punta del matí és impossible augmentar l'oferta de transport sense abordar inversions en infraestructura i, per altra banda, els nivells d'ocupació d'alguns trens són superiors al 90% (calculat amb 4 persones/m²) en diferents relacions com l'arribada a l'Autònoma i Sant Joan a les 9 hores procedent tant de Barcelona com de Sabadell. Això genera nous reptes a FGC en el futur de l'explotació de la línia Barcelona-Vallès, que puguin absorbir el potencial creixement de la línia tot mantenint uns estàndards de qualitat i puntualitat, que l'any 2016 va arribar al 99,21% en les línies metropolitanes de FGC, mesurada com els trens arribats amb puntualitat o amb un retard inferior a 3 minuts. (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, 2017)

Per fer front a aquesta dicotomia, l'empresa està treballant en la incorporació de nou material rodant, l'ampliació de la plantilla, la inversió en infraestructura, i en l'elaboració de nous plans d'explotació més optimitzats que puguin satisfer el creixement de demanda previst.

El present estudi es tracta d'un projecte acadèmic, emmarcat dins d'una passantia realitzada a l'Oficina Tècnica dels Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya durant el curs 2017-2018. Pretén elaborar una petita part d'aquestes tasques calibrant el calculador de marxos tècniques utilitzat per l'Oficina Tècnica, per calcular els temps de recorregut mínims, en cas de no interacció entre els trens.

La naturalesa del projecte requereix la utilització de dades de caràcter confidencial, proporcionades per FGC, que per motius de seguretat no poden ser difoses públicament. Aquestes, tot i estar indicades, no estan incloses dins de la memòria però s'han tingut en compte durant la realització de l'estudi.

1.2 Abast i objectius

La modelització i calibratge de l'eina utilitzada en les simulacions dinàmiques probabilistes d'un servei es tracta d'una empresa que requereix amplis coneixements tant en l'àmbit de l'explotació ferroviària com del software que s'utilitzi, el present estudi se centrarà en el desenvolupament i calibratge del calculador de marxos tècnics d'OpenTrack.

Perquè OpenTrack actuï com un calculador de marxos tècnics s'ha de codificar el servei per tal que no per tal de no tenir interacció entre trens, ja que això suposaria un potencial increment en els temps de recorregut. Per tant, els condicionants de circulació són: la velocitat màxima permesa per la infraestructura en cada tram, les característiques tècniques del propi material rodant i el factor humà en la conducció dels trens, obtenint així uns temps de recorregut propers als mínims entre dos punts determinats de la línia.

Si es desgranen els temps utilitzats per l'elaboració d'un horari comercial se'n poden diferenciar fins a 3 tipus:

- ∴ Temps de recorregut
- ∴ Temps d'estacionament
- ∴ Temps de correspondència

Detallant els dos primers ítems esmentats, es troba que aquests poden ser subdividits en el temps mínim tècnic (objecte d'anàlisi i simulació en el present estudi), els marges de puntualitat i les folgues del mateix horari. Cal posar en relleu que els marges de puntualitat, les folgues i els temps d'estacionament són producte dels criteris d'explotació triats per l'operador. Tanmateix, el temps mínim tècnic és invariant per un material, infraestructura i personal donat.

És per això que en el context de la línia Barcelona-Vallès, al límit de capacitat i presentant altes ocupacions, es posa de manifest la necessitat de disposar d'una eina calibrada capaç de simular aquest temps mínim tècnic.

Un cop calibrada l'eina per a la infraestructura actual, podrà ser utilitzada en la planificació estratègica per futures inversions ja sigui en la pròpia infraestructura, en material rodant o en els plans d'explotació.

Per tant el present estudi es fixa els següents objectius:

1. Calibrar el model virtual de la línia Barcelona-Vallès dins de la tolerància proposada i donada la infraestructura actual i el material rodant de referència obtenir un comportament lògic de les marxos simulades en la corba espai-temps.
2. Analitzar la robustesa del model calibrat per diferents polítiques d'aturades.
3. Donar directrius i recomanacions per futurs usos del model calibrat.

1.3 Metodologia

Són molts els factors que influeixen en l'exploració diària d'una línia ferroviària, des de la catenària fins al cap de circulació passant pel manteniment dels combois, imprescindible per garantir la seguretat del passatge. Aquests factors es poden agrupar en tres grans blocs (Huerlimann & Andrew, 2004), infraestructura, material rodant més personal de conducció i servei, la interacció dels quals desencadena l'exploració de qualsevol línia ferroviària. Segons els autors i tal com mostra la figura 1.1, l'optimització de l'exploració és resultat d'un procés iteratiu d'avaluació i adaptació del canvis generats en cada un dels agents esmentats.

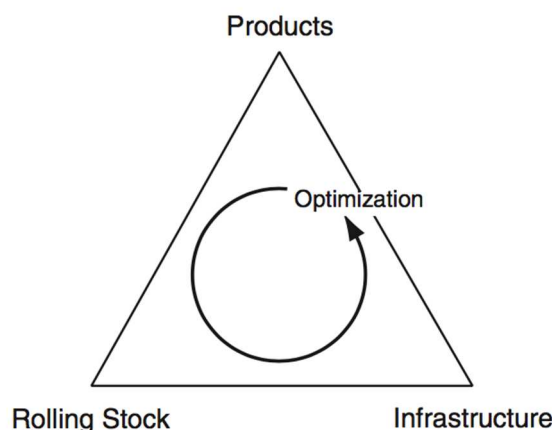


Figura 1.1 Trangle de planificació dels Ferrocarrils Nacionals Suïssos Font: Huerlimann i Andrew.

Aquesta metodologia és la utilitzada per la planificació dels Ferrocarrils Nacionals Suïssos (SBB-CFF-FFS) i adoptada per FGC. OpenTrack, software en el qual es suporta l'estudi, basa el seu funcionament en el triangle format per servei, material rodant i infraestructura.

Segons el reglament del sector ferroviari (BOE Nº315, 2004, p. 42719 a 42763), s'entén per infraestructura ferroviària la totalitat dels elements vinculats a les vies principals, de servei i ramals. Dins d'aquests elements hi trobem els terrenys, les estacions, passos a nivell (no n'hi han a la línia Barcelona-Vallès), la totalitat de les instal·lacions vinculades a la gestió i regulació del tràfic i seguretat, les telecomunicacions, l'electrificació, la senyalització i l'enllumenat.

Es considera material rodant als vehicles aptes per circular sobre vies fèrries i es divideix entre material motor i material remolcat. En el present estudi s'utilitza el parc de material rodant format pels automotors UT113 i UT114. Aquest material rodant va associat sempre al corresponent personal de conducció o maquinista.

El tercer element, el servei, defineix com es comportarà el material rodant sobre la infraestructura i està constituït per l'horari diari i els procediments a seguir en l'exploració, ambdós queden recollits al pla d'exploració. Durant el calibratge del calculador de marxos, la modelització del servei, es centrarà amb definir els itineraris i les aturades congruents amb les marxos buides reals calculades. Per tant no es modelitzaran els procediments propis del servei comercial però sí els solcs tipus que constitueixen l'horari.

1.4 Diagrama de treball

El present projecte s'organitza de tal forma que els tres blocs presentats anteriorment (infraestructura, material rodant amb el personal associat i servei) són una constant en el fil conductor del mateix tal com es mostra a la figura 1.2. Addicionalment s'afegeix un bloc referent al software (eina utilitzada per les simulacions de les marxes) OpenTrack amb l'objectiu de detallar les particularitats sorgides de la modelització amb el programa.

El primer pas és la modelització de la infraestructura i el material rodant, això engloba part de la primera etapa del estudi. Un cop definits els inputs cal comparar els resultats obtinguts amb les marxes tècniques reals, on s'engloba el factor humà que regeix la conducció, per calibrar el model generat mitjançant un procés iteratiu. Finalment, s'extreuen conclusions i recomanacions per cada un dels blocs.

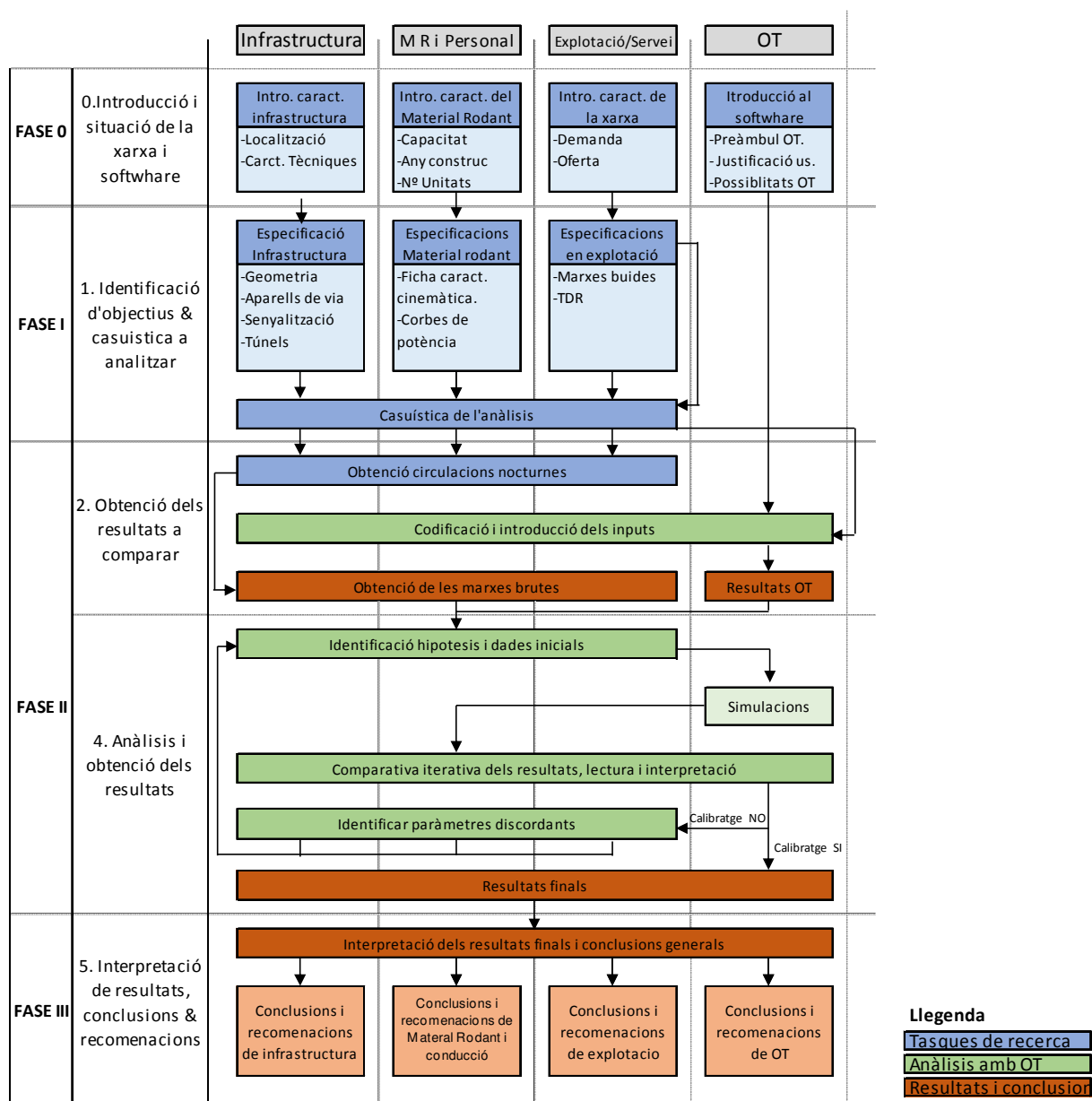


Figura 1.2 Versió final del pla de treball seguit en la realització del estudi. Font: Elaboració pròpia

2.2 Introducció a la línia Barcelona-Vallès.

La longitud total de la línia Barcelona-Vallès és de 48,05km, tots en via doble, d'ample UIC (1.435mm) i electrificada a 1.500V cc.

La línia es situa dins de la primera i segona corona de l'àrea metropolitana de Barcelona (figura 2.2), unint alguns dels municipis més importants de Barcelona a través de la serra de Collserola, en concret: Sant Cugat del Vallès, Cerdanyola del Vallès, Sant Quirze, Rubí, Terrassa i Sabadell; així com altres focus de demanda com la Universitat Autònoma o el polígon de Sant Joan. La infraestructura té una morfologia arborescent amb una terminal al sud (Pl. Catalunya) i fins a quatre ramificacions en direcció nord: Av. Tibidabo i Reina Elisenda a Barcelona, Terrassa-Nacions Unides i Sabadell-Parc del Nord al Vallès Occidental, essent totes elles estacions terminals.



Figura 2.2, Localització de l'infraestructura línia Barcelona-Vallès. Font: trenscat.cat.

Referent a la senyalització, la línia consta de senyalització lateral convencional i senyalització en cabina gràcies al sistema de protecció ATP (Automatic Train Protection) que proporciona codis de velocitats màximes. Cal apuntar que la via està banalitzada, és a dir, compta amb senyalització per cada un dels sentits de circulació. El sentit habitual de la marxa és per la dreta, essent la via 1 definida per les marxes ascendents (sentit Barcelona cap al Vallès) i la via 2 per les marxes descendents (sentit Vallès cap a Barcelona).

Amb l'objectiu d'augmentar notablement la capacitat de la infraestructura i, per tant, poder reduir les freqüències de pas, la línia Barcelona-Vallès aprofita les sinergies existents entre el seu sistema de senyalització i el seu sistema de protecció en l'explotació diària. És a dir, s'utilitza el sistema ATP com a font per la senyalització en cabina. Aquest fet es deu al fet que l'ATP presenta un acantonament més petit i aporta informació més precisa sobre la velocitat de circulació (velocitat màxima i velocitat objectiu).

A la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès s'hi ha d'afegir, de naturalesa ferroviària, el funicular de Vallvidrera que uneix aquest barri barceloní amb l'estació de Peu del Funicular.¹

La figura 2.3 mostra l'esquema de servei de la línia Barcelona-Vallès on hi estan representades les relacions ofertes actualment, abril de 2018. Es distingeixen dos tipus de serveis en funció de la seva naturalesa, els urbans (L6, L7 i L12) i els suburbans (S1, S2, S5, S6 i S7), les diferències entre els quals seran abordades en les següents pàgines.



Figura 2.3 Actuals serveis de la línia Barcelona-Vallès (Febrer 2018). Font: FGC.

La línia Barcelona-Vallès ha sigut, ja des de la seva construcció l'any 1863, concebuda exclusivament pel transport de passatgers.

Hi ha diversos dipòsits repartits al llarg de la infraestructura, concretament a Sarrià/Reina Elisenda, Rubí, Sabadell Parc del Nord i Terrassa Nacions Unides. No obstant, els tallers on es realitza el manteniment del material rodant es troben a Rubí (COR). Al centre d'operacions, a part de les tasques de manteniment de les unitats, es gestiona i monitora la circulació diària dels trens des del Centre de Comandament Integrat (CCI) tant per la línia Barcelona-Vallès com per la Llobregat-Anoia.

Avui dia FGC disposa, per l'explotació comercial de la línia Barcelona-Vallès, d'un parc homogeni quant a prestacions cinemàtiques però heterogeni pel que fa als proveïdors. Els 46 vehicles automotors que conformen la totalitat del material rodant comercial es divideixen en 3 sèries: UT112 (fig 2.4), UT113 (fig 2.5) i UT114 (fig 2.6). Totes les unitats tenen una velocitat màxima limitada de 90km/h, corresponent a la velocitat màxima de circulació de la línia Barcelona-Vallès imposada pels condicionants de traçat, i estan concebudes exclusivament pel transport de viatgers.

UT112

Posades en servei a partir de l'any 1995 i fabricades per CAF, aquesta sèrie està composta per 4 cotxes per unitat, amb una capacitat unitària de 552 persones (4 persones m²). Actualment hi ha 22 unitats de la sèrie 112 en circulació.



Figura 2.4 Perfil de l'UT112. Font: Trenscat.com.

¹ La infraestructura corresponent al funicular de Vallvidrera també està inclosa dins del Metro del Vallès, no obstant, no serà objecte d'estudi.

UT113

Posades en servei a partir de l'any 2014 i fabricades per Siemens i Alstom, aquesta sèrie està composta per 4 cotxes per unitat, amb una capacitat unitària de 592 persones (4 persones m²). Actualment hi ha 19 unitats de la sèrie 112 en circulació.



Figura 2.5 Perfil de l'UT113. Font: Trenscat.com.

UT114

Posades en servei a partir de l'any 2014 i fabricades per Siemens i Alstom, aquesta sèrie està composta per 3 cotxes per unitat, amb una capacitat unitària de 445 persones (4 persones m²). Actualment hi ha 5 unitats de la sèrie 114 en circulació que donen servei a la branca d'Avinguda Tibidabo.



Figura 2.6 Perfil de l'UT113. Font: Trenscat.com.

A data d'abril de 2018, FGC oferta un total de 8 serveis ferroviaris a la línia Barcelona-Vallès a més del funicular de Vallvidrera. (figura 2.3 pàgina 14) Aquestes relacions es poden dividir en dos grans blocs en funció de la seva naturalesa:

Serveis Urbans (L6, L7 i L12)

Els serveis urbans tenen la nomenclatura (L de local) integrada dins de la xarxa de metro de Barcelona operada per TMB. Donen cobertura a la zona densa de Barcelona amb les següents relacions:

- L6 Plaça Catalunya – Sarrià i viceversa (només circula en hores vall).
- L7 Plaça Catalunya – Av. Tibidabo i viceversa.
- L12 Sarrià – Reina Elisenda, servei llançadora.

Serveis suburbans (S1, S2, S6 i S7)

Constitueixen l'oferta a les dues branques del Vallès i són considerats com serveis suburbans, ja que els temps de recorregut oscil·la entre els 20 i 50 minuts.

La política d'aturades varia entre els serveis S1 i S2, que representen l'oferta bàsica en les relacions entre Barcelona i el Vallès, i els S6 i S7 que suposen un reforç del servei en hora punta.

Els serveis S1 i S2 ofereixen una relació ràpida entre la corona metropolitana i el tram Plaça Catalunya – Gràcia, no realitzant parada a les estacions de Sant Gervasi, La Bonanova i les Tres Torres. A part, mantenen la capil·laritat fora de la zona urbana, on realitzen parada a totes les estacions.

- ∴ S1 Plaça Catalunya – Terrassa Nacions Unides i viceversa.
- ∴ S2 Plaça Catalunya – Sabadell Parc del Nord i viceversa.

Per altra banda, els serveis S5, S6 i S7 constitueixen un reforç durant les hores puntes entre Barcelona i els principals punts de demanda del Vallès (a destacar: la UAB i el polígon de Sant Joan). Aquests serveis es consideren prolongacions de la L6, ja que una de les seves principals funcions és garantir la capil·laritat en la zona urbana durant l'hora punta, realitzant parada a totes les estacions de Barcelona i essent directes entre Sarrià i La Floresta. Cal recordar al lector que els serveis L6 no circulen durant l'hora punta de matí (HPM) i per tant els serveis S5, S6 i S7 són els únics que realitzen parada a Tres Torres, La Bonanova i Sant Gervasi.

- ∴ S5 Plaça Catalunya – Sant Cugat i viceversa.
- ∴ S6 Plaça Catalunya – Universitat Autònoma i viceversa.
- ∴ S7 Plaça Catalunya – Rubí i viceversa.²

A continuació (taula 2.1) es mostren els temps de recorregut en HPM. Cal destacar que es mantenen força homogenis durant tot el dia i per ambdós sentits de la circulació.

Temps de recorregut en HPM [minuts].	Pl. Catalunya	Sarrià	Av. Tibidabo	Sant Cugat	Rubí	TRS N. Unides	U. Autònoma	SBD P. del Nord
Pl. Catalunya		10	10	26	33	50	35	49
Sarrià	11		15	15	22	40	24	40
Av. Tibidabo	10	15		29	37	54	39	23
Sant Cugat	27	15	30		7	24	9	25
Rubí	34	23	39	7		17	19	34
TRS N. Unides	50	39	55	23	16		35	50
U. Autònoma	36	25	41	10	20	38		15
SBD P. del Nord	49	41	53	25	35	53	15	

Taula 2.1 Temps de recorregut entre les estacions origen de línia. Font: FGC i elaboració pròpia.

Temps de recorregut, en minuts, entre les estacions que són origen i/o final de servei, a excepció de Reina Elisenda. Es diferencien, en blau ombrejat, les relacions ofertes amb correspondència. Aquests temps de referència estan calculats durant l'hora punta d'un dia feiner i lectiu.

² Alguns serveis S7 tenen origen Terrassa Nacions Unides o Terrassa Rambla durant l'hora punta del matí.

Amb l'objectiu de millorar el confort tan dels usuaris convencionals com dels escolars, FGC ofereix alguns serveis total o parcialment reservats per escolars i, per tant, restringits de forma total o parcial a la resta d'usuaris. Aquests serveis són afegits a la malla sistemàtica diària dels dies feiners i lectius. Concretament:

- .: Servei E901 amb origen Plaça Catalunya (8:21h) i destí Bellaterra (8:55h). 4 cotxes reservats per escolars.
- .: Servei C901 amb origen Plaça Catalunya (9:11h) i destí Baixador de Vallvidrera (9:28h). 4 cotxes reservats per escolars.
- .: Servei E902 amb origen Sant Joan (16:44h) i destí Plaça Catalunya (17:16h). 2 cotxes reservats per escolars.
- .: Servei H904 amb origen Mira Sol (16:52h) i destí Sant Cugat (16:55h). 2 cotxes reservats per escolars.
- .: Servei H902 amb origen Mira Sol (16:58h) i destí Plaça Catalunya (17:28h). 2 cotxes reservats per escolars.

Un cop introduïda la línia Barcelona-Vallès i aïllat el problema objecte del present estudi, cal identificar els inputs a modelitzar amb OpenTrack i com el software té en compte cadascuna de les variables que posteriorment seran calibrades per obtenir uns temps de recorregut tècnics dins de la tolerància establerta. És per això que en els apartats següents en primer lloc es presenta el software en qüestió i posteriorment s'analitzen les particularitats de la línia subjectes a ser modelades.

3. Aproximació al software OpenTrack.

OpenTrack (OT) és un software de suport a la planificació ferroviària per la simulació dinàmica i les eventualitats de la circulació, desenvolupat en col·laboració de l'ETH de Zurich i l'SBB CFF FFS (Ferrocarrils Federals Suïssos). El programa es basa en un calculador de marxes molt potent i que permet modelitzar moltes particularitats de la circulació gràcies a un gran nombre de parametritzacions.

Entre els clients d'OpenTrack es troben algunes de les principals empreses del sector ferroviari com SBB-CFF-FFS, la SNCF i la RATP a França, DB a Alemanya, CPTM a São Paulo, els metros de Seul, Hong-Kong i Beijing, Alstom i Siemens entre altres companyies, consultories i universitats d'arreu del món. Donat l'extens ús que es fa d'aquest software en el sector i les possibilitats que ofereix, FGC el va escollir per desenvolupar les seves simulacions dinàmiques.



Figura 3.1 Mostra d'operadors i fabricants que consten entre els clients d'OpenTrack. Font: Opentrack.ch.

Com es mostra a la figura 3.2, les simulacions es generen a partir de tres inputs a definir: infraestructura ferroviària, material rodant amb el personal de conducció i horari. OpenTrack calcula els moviments de tots els trens al segon, reproduint amb exactitud el comportament de les instal·lacions de senyalització i seguretat.

Durant la simulació, l'eina primerament calcula les marxes, seguidament identifica els conflictes de circulació, els resol, i posteriorment calcula novament les marxes, essent doncs, un procés iteratiu. El software permet, reproduir comportaments dinàmics i microscòpics de tots els elements del sistema ferroviari, extreure'n resultats quantitatius i representacions dels mateixos en forma de diagrames, gràfics, estadístiques, etc.

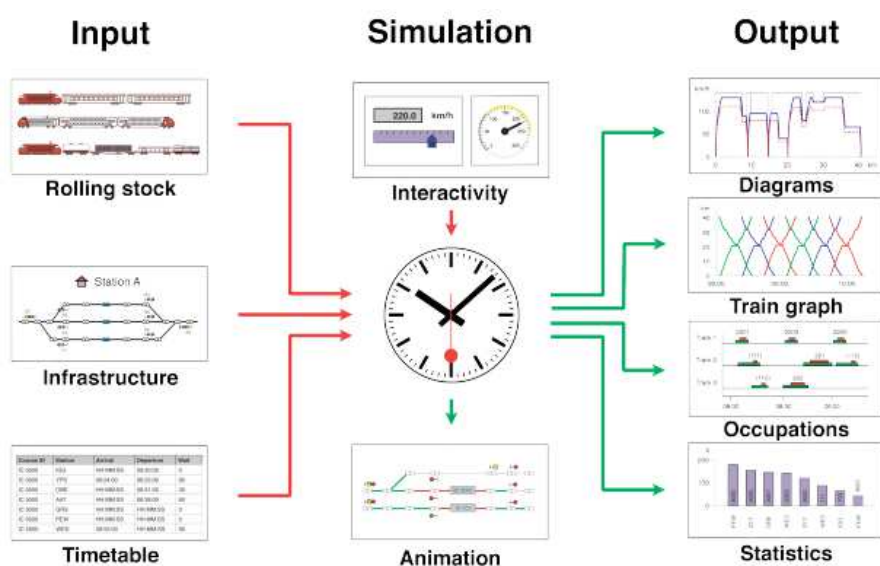


Figura 3.2 Esquematzació del funcionament d'OpenTrack. Font: Opentrack.ch.

Com ja s'ha comentat anteriorment, tot i les possibilitats del software, el present estudi es centra en el càlcul de marxes tècniques. Per conseqüència els inputs a codificar es redueixen a material rodant, infraestructura i comportament en la conducció. Referent a l'horari, es modelitzaran tan sols solcs tipus amb la política d'aturades prèviament seleccionada.

Dades d'infraestructura

OpenTrack defineix la infraestructura a partir de nodes i eixos que admeten certs atributs com longitud, rampa, velocitats màximes... El software també permet crear i gestionar la senyalització i la lògica dels enclavaments gràcies a uns ens anomenats paths i itineraris que determinen per on pot circular cada solc i la preferència en cas de conflictes.

Material rodant i conducció

Es caracteritza cada automotor amb la seva informació mecànica i geomètrica (esforços de tracció, diagrames de velocitat, pes, longitud, factors d'adherència i sistema de potència), generant la unitat tren que circularà per la infraestructura modelitzada.

És important ajustar els paràmetres al tipus de conducció que es realitza en cada cas, ja que aquest aspecte és potencialment condicional a l'hora d'obtenir un model ben calibrat. Cal remarcar que, el factor humà juga un paper clau en la conducció del material rodant i ve condicionat per diversos motius com, la formació dels maquinistes i el coneixement de la infraestructura entre d'altres.

OpenTrack dona la possibilitat d'ajustar paràmetres per tal d'aproximar el comportament simulat al real. Com per exemple el rendiment ("Performance") que és un percentatge d'ajust que s'aplica sobre la potència d'acceleració i la velocitat màxima assolida, o el temps mínim a mantenir una velocitat ("Min. Time hold speed"), el tren només augmentarà la seva velocitat si la pot mantenir per un mínim de temps específic, aquest factor redueix l'agressivitat de les seqüències acceleració-frenada.

Simulació

Durant la simulació el material rodant definit es mou per la infraestructura generada en les condicions de la política de servei i itineraris descrits.

És important definir rigorosament tots aquests inputs. Per això s'han de recopilar totes les dades requerides per OpenTrack necessàries per generar el model de simulació, poder calibrar-lo i obtenir resultats pròxims a les dades reals obtingudes a partir de les circulacions en buit.

Aquestes dades reals, seran obtingudes en condicions de contorn concretes, sense interacció entre trens (es realitzen en horari nocturn), a velocitat màxima, veient tots els discs en verd i amb el mateix maquinista cosa que permet homogeneïtzar el comportament en la conducció entre les diferents mesures. La suma d'aquestes condicions fa que els resultats obtinguts s'acostin molt al temps de recorregut mínim i per tant sigui comparable amb el temps resultant de les simulacions sense interacció de trens.

4. Modelització i mesures de referència.

Amb el fi d'obtenir una modelització rigorosa de la línia, s'han analitzat els diferents elements que componen la infraestructura i el material rodant, sempre des de l'òptica relatada anteriorment i analitzant com el programa interactua amb cada una d'aquestes variables. Cal remarcar que el present apartat es centra en les exigències de modelització que el programa requereix, per tant, altres elements o característiques no detallats, estan fora de l'abast del present estudi o no són considerats com a rellevants per la simulació per part d'OpenTrack.

El present apartat i la introducció de dades a OpenTrack han estat realitzats seguint cinc documents bàsics, a saber:

- ∴ Esquemes d'enclavaments i estacions de la línia BV. Document confidencial.
- ∴ Perfils i alineacions de la línia BV. Document confidencial.
- ∴ Manual d'OpenTrack.
- ∴ Fitxes tècniques del material rodant. Document confidencial.
- ∴ Descripció dels solcs tipus a modelitzar

4.1 Especificacions infraestructurals.

A continuació es presenta l'esquema funcional de la línia, (figura 4.1) on s'hi observen els elements principals, tals com estacions, túnels i aparells de via de la línia i la seva localització. Aquest esquema ofereix una visió global de la disposició de les vies al llarg del recorregut.

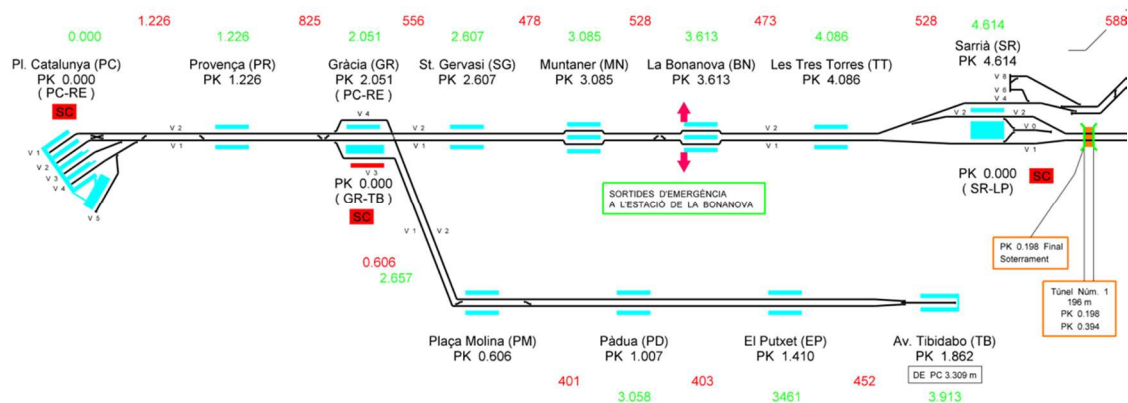


Figura 4.1a Esquematització de la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès, tram Pl. Catalunya - Sarrià. Font: FGC.

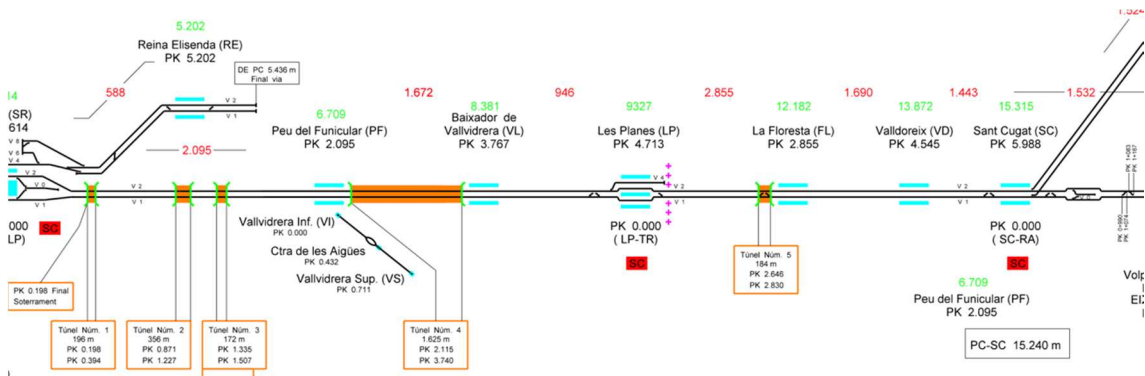


Figura 4.1b Esquematització de la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès, tram Sarrià - Sant Cugat. Font: FGC.

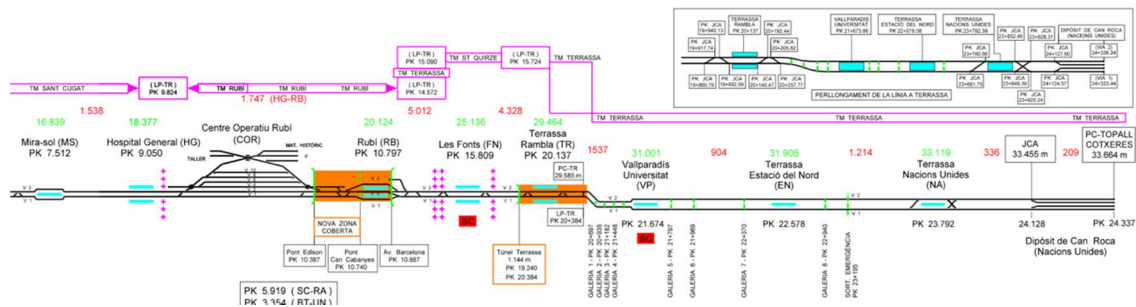


Figura 4.1c Esquematització de la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès, tram Sant Cugat – Terrassa. Font: FGC

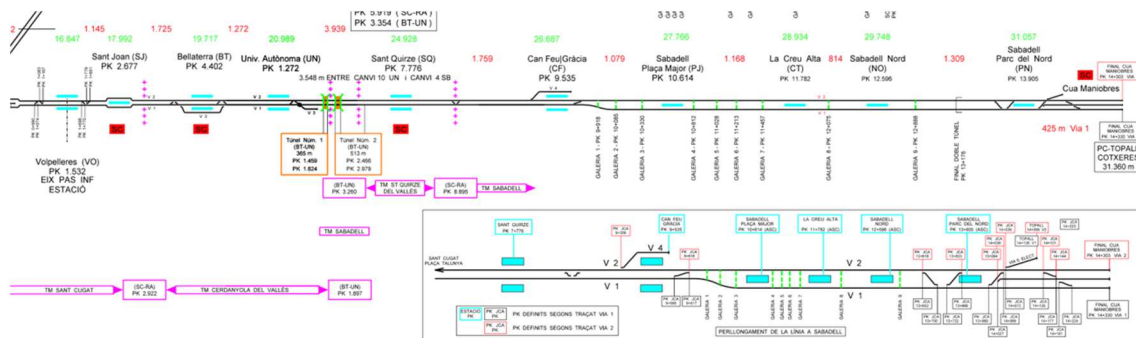


Figura 4.1d Esquematització de la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès, tram Sant Cugat - Sabadell. Font: FGC

Geometria

La descripció geomètrica de la infraestructura és considerada el suport de la modelització, ja que és l'ens que suporta la circulació del material rodant sobre el qual s'hi detallen tots els elements de seguretat i senyalització que fan possible l'explotació en les condicions desitjades.

Les característiques geomètriques de la infraestructura requerides per OpenTrack per al càlcul de marxes tècniques són:

- ∴ Distàncies
- ∴ Pendents
- ∴ Radis de curvatura
- ∴ Túnel

Els elements exposats són condicionants a l'hora de determinar el perfil de velocitat i per tant obtenir els temps de recorregut entre punts d'interès. És per això que la modelització dels mateixos és una etapa clau del present estudi i serà objecte d'anàlisi en les pàgines següents.

Distàncies

Per tal d'obtenir un model fidedigne cal tenir present que les distàncies introduïdes al software han de ser les reals, és a dir, la que el tren recorre entre els dos punts a modelitzar i no la projecció horitzontal d'aquestes, presentada en els fulls de perfils i alineacions.

Pendents

La línia BV, travessa una orografia accidentada, per aquest motiu presenta un perfil exigent, assolint pendents de fins a 46 mil·lèsimes en alguns punts de la xarxa, a la figura 4.2 mostra de forma esquemàtica el perfil de la línia.

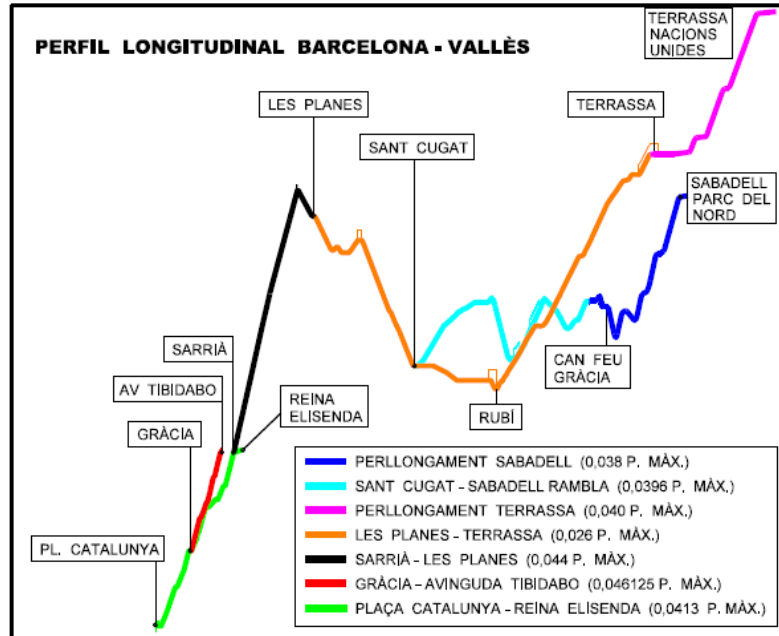


Figura 4.2 Perfil i traçat del tram Plaça Catalunya - Provença. Font: FGC.

Perfil (no a escala) de la línia BV, amb els trams discernits per orígens de punts quilomètrics.

En la figura 4.2, s'observa un primer tram amb marcades pendents positives (sentit Plaça Catalunya a Les Planes), seguidament, un tram amb pendent negatiu (Les Planes – Sant Cugat) fins a la bifurcació de les dues branques. En aquest punt, la branca de Terrassa continua amb tendència ascendent a partir de Rubí i fins Nacions Unides; per altra banda que la branca de Sabadell presenta un perfil irregular fins a l'entrada a aquesta localitat on el pendent torna a ser marcadament positiu en sentit Barcelona cap el Vallès.

Qualsevol gradient afegeix o resta resistència a l'avanç, en funció del seu signe, proporcionalment a la massa del tren. En la codificació d'OpenTrack aquesta resistència està regida per l'equació 1.

$$R_s = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$R_s = m \cdot g \cdot \tan(\alpha) = m \cdot g \cdot \frac{l}{1000} \quad \text{per } \alpha \text{ petits}$$

Amb:

R_s :	Reistència al gradient	$[R_s] = N$
m :	Massa del tren	$[m] = kg$
g :	Acceleració de la gravetat	$[g] = m/s^2$
α :	Angle d'inclinació	$[\alpha] = ^\circ \text{ o rad}$
l :	Pendent	$[l] = \%$

Túnel

Un altre element diferenciable a l'hora de modelitzar la infraestructura en OpenTrack són els túnels existents, per tant cal analitzar-ne seves característiques i naturalesa. Tant la rugositat de les parets, l'àrea i forma de la secció transversal com la longitud d'aquest tenen influència directa sobre la resistència a l'avanç (López Pita, Infraestructuras ferroviarias, 2006) ja que la columna d'aire generada té un impacte pels efectes aerodinàmics.

En la línia Barcelona-Vallès hi trobem un total d'11 seccions en túnel. 4 d'elles considerades soterraments en zones urbanes i 7 considerades túnels, la localització dels quals es mostra a la figura 4.1 de les pàgines 23-24. No obstant, l'impacte de les diferents seccions sobre els combois són diferents. Aquests presenten diferències substancials en part degudes a, principalment, a la utilització de diferents mètodes constructius.

- ∴ Soterrament Barcelona: entre Plaça Catalunya – Sarrià, ramal de Tibidabo i Reina Elisenda, secció en via doble.
- ∴ Túnel 1: entre les estacions de Sarrià i Peu del Funicular, secció en via doble.
- ∴ Túnel 2: entre les estacions de Sarrià i Peu del Funicular, secció en via doble.
- ∴ Túnel 3: entre les estacions de Sarrià i Peu del Funicular, secció en via doble.
- ∴ Túnel 4: entre les estacions de Peu del Funicular i Baixador de Vallvidrera, secció en via doble.
- ∴ Túnel 5: entre les estacions de Les Planes i La Floresta, secció en via doble.
- ∴ Túnel 1 (BT-UN): entre les estacions de Bellaterra i Universitat Autònoma, secció en via doble.
- ∴ Túnel 2 (BT-UN): entre les estacions de Bellaterra i Universitat Autònoma, secció en via doble.
- ∴ Soterrament Sabadell: entre les estacions de Can Feu-Gràcia i Sabadell-Parc del Nord, doble secció en via única i acabament amb dovelles de formigó prefabricades.
- ∴ Soterrament Rubí: a l'entorn de l'estació de Rubí, secció en via doble.
- ∴ Soterrament Terrassa: entre les estacions de Terrassa-Rambla i Terrassa-Nacions Unides, doble secció en via única i acabament amb dovelles de formigó prefabricades.

En aquest cas OpenTrack modelitza la resistència a l'avanç deguda als túnels mitjançant el factor (f_T) segons l'equació 2. Se n'extreu que, per una velocitat determinada, un factor major, és a dir menys secció i més rugositat, la resistència augmenta. Per simplificar la modelització i la tria del valor factor túnel, OpenTrack dona l'opció de modelitzar-ho segons túnels simples o dobles i llisos o rugosos.

$$R_T = f_T \cdot v^2 \quad (2)$$

Amb:	R_T :	Resistència al túnel	$[R_T] = N$
	f_T :	Factor de túnel	$[f_T] = kg/m$
	v :	Velocitat	$[v] = m/s$

Radis

Com es recull a la taula 4.1, la infraestructura de la línia Barcelona-Vallès presenta radis mínims de fins a 139 m. Radis tan petits restringeixen la velocitat màxima per risc a descarrilaments. El pas per corba dels trens genera una resistència a l'avanç (R_B) degut al desplaçament dels sets de rodes rígids per l'interior i exterior del carril i al fregament transversal generat. Tal i com indica l'equació 3 de Roeckl per trens estàndards (Deutsch Bahn) la resistència en corba depèn del radi i de la massa del tren i és d'aquesta manera com OpenTrack codifica el radi de curvatura, mitjançant l'equació de Roeckl.

$$\begin{aligned} R_B &= \frac{6,3}{r-55} \cdot m && \text{per } r \geq 300\text{m} \\ R_B &= \frac{4,91}{r-30} \cdot m && \text{per } r < 300\text{m} \end{aligned} \quad (3)$$

Amb:

R_B :	Resistència en corba	$[R_B] = \text{N}$
r :	Radi corba	$[r] = \text{m}$
m :	Massa del tren	$[m] = \text{kg}$

Finalment, a tall de síntesi s'han recollit a la taula 4.1 les característiques geomètriques necessàries per a la modelització en OT.

Tram	Pl.Catalunya - Gràcia	Gràcia - Av.Tibidabo	Gràcia - Sarrià	Sarrià - R.Elisenda	Sarrià - St.Cugat	St.Cugat - Rubí	Rubí - Terrassa	St.Cugat - UAB	UAB - Sabadell
Longitud (km)	2,05	1,86	2,56	0,59	10,7	4,9	12,96	5,7	6,74
Número de túnels	1	1	1	1	5	1	2	0	3
% longitud en túnels	100	100	100	100	42,2	3,1	39,7	0	20,8
Desviaments	17	5	5	7	17	21	31	26	28
Pendent màxim	38 ‰	46 ‰	41 ‰	3 ‰	44 ‰	-7 ‰	48 ‰	-38 ‰	38 ‰
Radi mínim	150 m	150 m	180 m	180 m	140 m	152 m	200 m	205 m	139 m
Velocitat màxima	60 km/h	60 km/h	60 km/h	30 km/h	90 km/h	90 km/h	90 km/h	90 km/h	90 km/h

Taula 4.1 Característiques bàsiques de la infraestructura. Font: FGC i elaboració pròpia.

Es mostren, de manera resumida, les característiques geomètriques de la via per trams.

Aparells de via

La línia Barcelona-Vallès disposa d'un total de 157 aparells de via que es troben localitzats segons es mostra a la figura 4.1 de les pàgines 19-20.

Per motius de seguretat la velocitat màxima de pas per agulla desviada sempre és inferior. La resistència a l'avanç que ofereix l'aparell de via es despreciable. Seguint aquesta línia, el manual d'OpenTrack (Huerlimann, Daniel; Nash, Andrew B., 2017) comenta, "els aparells de via, per la seva naturalesa ofereixen certa resistència a l'avanç, no obstant el programa els considera negligibles per la petita influència que té en les operacions."

Els aparells són especialment utilitzats a les estacions terminals i bifurcacions. A la figura 4.3-4.5 es mostren les diferents situacions on els trens requereixen el pas per agulles durant l'exploració

diària comercial i que seran objecte de modelització i simulació. A tall d'exemple, es mostra en la figura 4.3a i 4.3b les configuracions d'entrada i sortida a l'estació terminal de Plaça Catalunya i les bifurcacions de Gràcia (figura 4.4) i Sant Cugat (figura 4.5). Cal notar la incidència d'aquests en les estacions de Gràcia i Sant Cugat on, com es mostra a la figura 4.4 i 4.5, la velocitat de pas per l'agulla desviada és notablement inferior que per via directa.

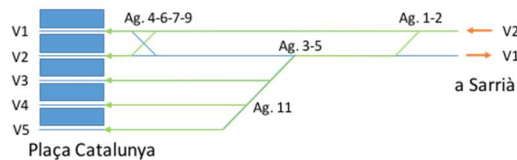


Figura 4.3a Configuració d'entrades a Plaça Catalunya. Font: Elaboració pròpia.

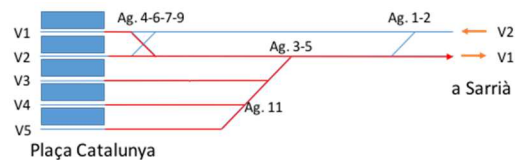


Figura 4.3b Configuració de sortides de Plaça Catalunya. Font: Elaboració pròpia.

Com es pot observar (figura 4.4), pel cas de Gràcia, el pas per l'agulla 5 en desviada (cap a la via 1 de la branca del Tibidabo) s'ha de fer, com a màxim a 30 km/h. Per contra, el pas per via directa en direcció Sarrià té una velocitat màxima de 60 km/h. En el cas de Sant Cugat (figura 4.5) les diferències són majors, essent el pas per l'agulla 14 en configuració desviada (cap a Terrassa) limitat a 30 km/h. Per contra, el pas per l'agulla 14 per via directa (cap a Sabadell) es pot realitzar fins a 90 km/h.

La diferència entre ambdues velocitats de pas, per via directa o desviada, fan que, comparativament, les pèrdues generades pel fregament conseqüència del pas per aquestes agulles siguin negligibles.



Figura 4.4 Configuració d'agulles i itineraris a Gràcia. Font: Elaboració pròpia.

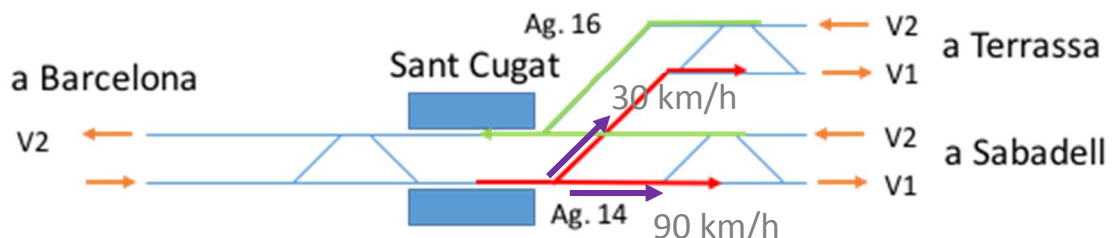


Figura 4.5 Configuració d'agulles i itineraris a Sant Cugat. Font: Elaboració pròpia.

Senyalització i sistemes de protecció

La senyalització juga un paper clau en la circulació ferroviària, ja que s'encarrega principalment de gestionar el tràfic i garantir que el servei es compleix amb l'itinerari, l'horari i les aturades predefinides, en condicions de seguretat. Addicionalment, els sistemes de protecció garanteixen la seguretat front a errors. Per això supervisen la conducció del tren i en regulen la velocitat si no es compleixen les condicions de seguretat establertes. A la línia Barcelona-Vallès, FGC utilitza senyals verticals no lluminosos (panells) i lluminosos amb blocatge automàtic, i el sistema de seguretat ATP (Automatic Train Protection).

A continuació (figura 4.6) es presenten els principals tipus de senyalització lateral no lluminosa present a la línia Barcelona-Vallès de FGC. D'esquerra a dreta, el primer senyal anuncia una imminent restricció de velocitat en aquest cas a 50 km/h, el segon senyal indica l'entrada en vigor de la limitació prèviament anunciada i el tercer senyal anuncia el final de la limitació que hi havia vigent.



Figura 4.6 Principals senyals fixes convencionals de la línia BV. Font: FGC

Seguidament (figura 4.7) es presenten els principals tipus de senyalització lateral lluminosa present a la línia Barcelona-Vallès de FGC. D'esquerra a dreta, el primer disc anuncia via lliure i per tant es pot circular a la velocitat màxima permesa; el segon senyal indica anunci de parada, conseqüentment el maquinista ha de començar a frenar per assegurar que es podria aturar abans de passar el proper disc que, possiblement es trobarà en vermell. El tercer disc indica prohibició de depassar, i per tant la velocitat ha de ser 0. L'últim disc indica que, tot i estar en vermell el senyal pot ser arrabassat per una maniobra en concret a una velocitat determinada que oscil·la entre 5 i 30 km/h en funció de la maniobra.

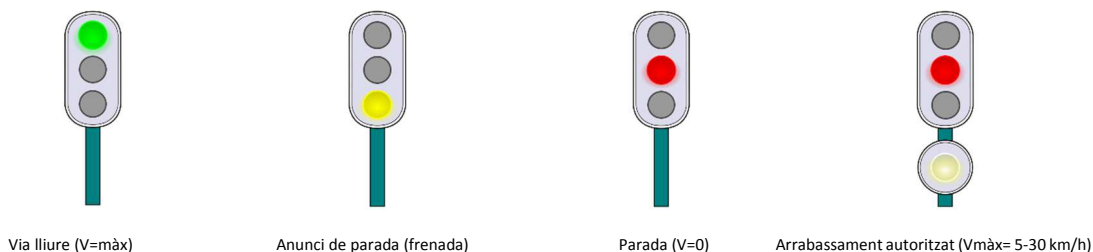


Figura 4.7 Estats dels senyals fixes lluminoses de la línia BV. Font: Viquipèdia

Complementàriament, el sistema de seguretat ATP proporciona informació en cabina sobre la velocitat objectiu i la velocitat màxima de circulació en cada tram. La supervisió d'aquesta velocitat es realitza de forma contínua. La línia Barcelona-Vallès té dos tipus de tecnologies, permetent rangs de velocitats diferents:

- ∴ ATP AM. Amb els codis de velocitat: 90/90, 90/60, 60/60, 60/30, 30/30, 30/0 i 0/0.³
- ∴ ATP FM. Amb els codis de velocitat: 90/90, 90/60, 60/60, 60/45, 45/45, 45/30, 30/30, 30/20, 20/20 i 20/0.

Segons l'estat de la senyalització lluminosa existeixen dos règims de circulació a la línia Barcelona-Vallès. (els panells laterals són sempre d'obligat compliment)

- ∴ Senyals lluminoses enceses i ATP.

A l'estar els codis de velocitats de l'ATP associats als del sistema de senyalització, no hi ha variació en la circulació si el disc està en verd o vermell, és a dir, el acantonament queda definit per la senyalització vertical lluminosa. No obstant, quan el disc està en ambre és possible ajustar la frenada al nivell del acantonament del sistema ATP. Aquest règim de circulació és utilitzat en els trams Plaça Catalunya – Sarrià, Sant Cugat – Terrassa, Sant Cugat – Sabadell i al ramal de Reina Elisenda.

- ∴ Senyals lluminoses apagades i ATP.

En aquest règim els cantons queden definits pels circuits de via electrònics del sistema ATP i la senyalització vertical lluminosa es considera inexistent. Aquesta configuració és utilitzada en els trams Gràcia - Av. Tibidabo i Sarrià – Sant Cugat.

En qualsevol dels dos règims de circulació, en cas de contradicció entre la senyalització lateral i la senyalització en cabina, el maquinista han de respectar la més restrictiva d'ambdós.

A continuació, figura 4.8 es presenten les velocitats màximes de cada tram segons el sentit habitual de circulació. Per altra banda, a vegades s'afegeixen limitacions temporals de velocitat (LTV) que són zones determinades on la velocitat queda reduïda per motius de manteniment. Aquestes tenen una duració en l'espai i en el temps determinada.

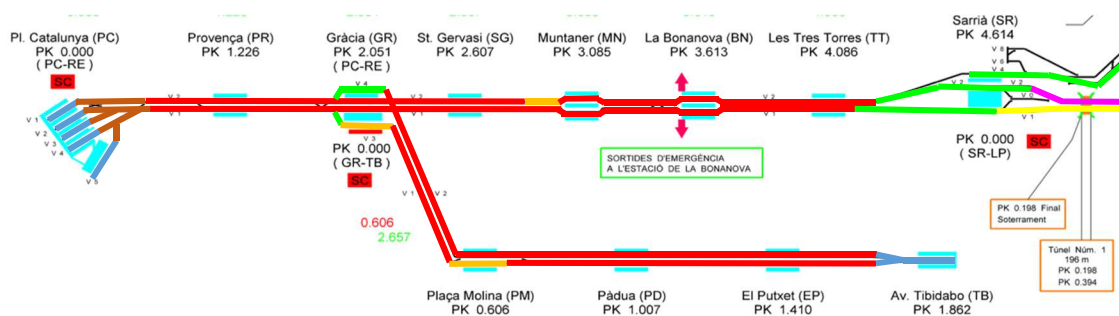


Figura 4.8a Codis de velocitats en el tram Plaça Catalunya - Sarrià. Font: FGC i elaboració pròpia.

³ Per a la lectura del codis ATP, el primer dígit correspon a la velocitat màxima (a l'entrada) del circuit de via i el segon és la velocitat objectiu (a la sortida del circuit de via).

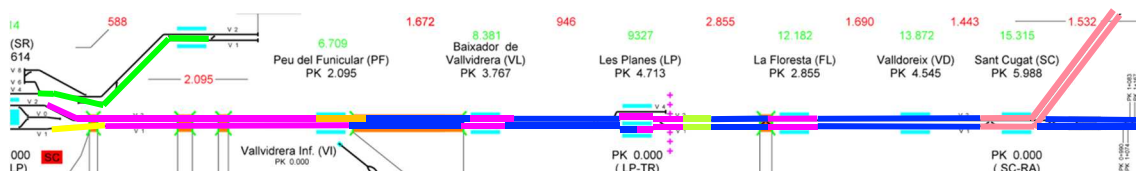


Figura 4.8b Codis de velocitats en el tram Sarrià – Sant Cugat. Font: FGC i elaboració pròpia.

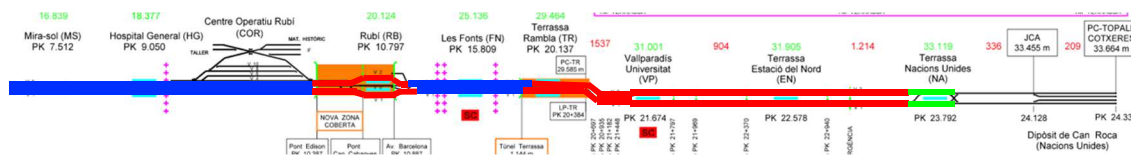


Figura 4.8c Codis de velocitats en el tram Mira-sol – Nacions Unides. Font: FGC i elaboració pròpia.

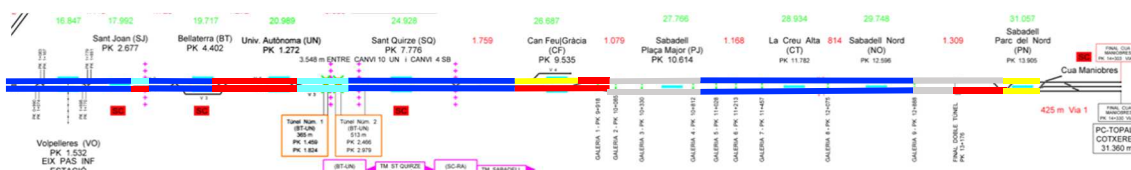


Figura 4.8d Codis de velocitats en el tram Volpelleres – Parc del Nord. Font: FGC i elaboració pròpia.

Esquema no a escala realitzat a partir dels codis de velocitats màxims en cada tram de la línia pel sentit habitual de circulació (ascendent per via 1 i descendent per via 2).

Legenda:

20 km/h	55 km/h
25 km/h	60 km/h
30 km/h	70 km/h
40 km/h	80 km/h
45 km/h	85 km/h
50 km/h	90 km/h

Per la modelització del sistema de seguretat i els aspectes de la senyalització, a OpenTrack es defineixen un seguit de punts característics de la xarxa, geomètrics (canvi de radi, canvi de gradient, etc.) i de la infraestructura (agulles, senyalització, estacions, etc.). En cada un d'aquests vèrtexs es té la possibilitat d'afegir-hi un senyal i associar-li les propietats corresponents. Referent a les velocitats màximes en cada tram, els esmentats vèrtex són units per segments a qui se li poden donar uns atributs tals com la longitud, el radi, el gradient i la velocitat màxima en cada sentit de circulació.

4.2 Especificacions del Material rodant.

A fi de resumir les característiques geomètriques, mecàniques i cinemàtiques del material rodant s'elaboren les taules 4.2 i 4.3 a partir de les fitxes tècniques de cada UT confeccionades pels proveïdors. Tant els atributs mostrats a les taules 4.5 i 4.6 com les corbes de potència (figura 4.9 i 4.10) són inputs requerits per OpenTrack per tal de reproduir el comportament del material rodant durant la simulació, aquestes últimes defineixen l'esforç de tracció màxim en funció de la velocitat.

Cal esmentar que, el material rodant de la línia Barcelona-Vallès està capat a 90 km/h, coincidint amb la velocitat màxima permesa per la infraestructura. El traçat de la línia i la proximitat entre algunes estacions expliquen aquest fet.

Durant el procés de calibratge es comparen els temps de simulació reals amb els registres reals de les circulacions nocturnes realitzades amb UT113 i UT114. Per aquest motiu es calibra exclusivament aquests dos materials, ara bé, donat que les propietats cinemàtiques i les característiques geomètriques i mecàniques de les UT112 i UT113 són comparables, s'assumeix que els resultats obtinguts amb les UT113 són extrapolables al material UT112.

UT113

Sèrie 113	Valor
Pes en tara	143,2 t
Longitud	80 m
F. d'adherència	0,78
Càrrega d'adherència	111 t
Repartiment motor	Mc-M-R-Mc
Vmàx disseny	100 km/h
Vmàx servei	90 km/h
F. de massa rotativa	1,08
Acceleració màxima	1,15 m/s ²

Taula 4.2 Característiques UT113. Font: Siemens, CAF i elaboració pròpia.

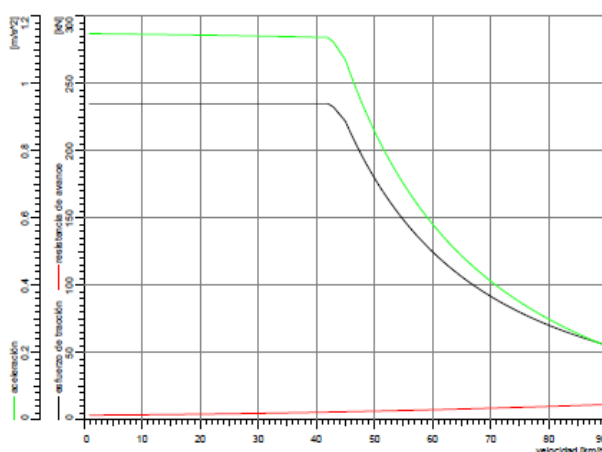


Figura 4.9 Corba de potència de la UT113. Font: Siemens.

UT114

Sèrie 114	Valor
Pes en tara	111,3 t
Longitud	60 m
F. d'adherència	1
Càrrega d'adherència	111,3 t
Repartiment motor	Mc-M-Mc
Vmàx disseny	100 km/h
Vmàx servei	90 km/h
F. de massa rotativa	1,08
Acceleració màxima	1,15 m/s ²

Taula 4.3 Característiques UT114. Font: Siemens, CAF i elaboració pròpia.

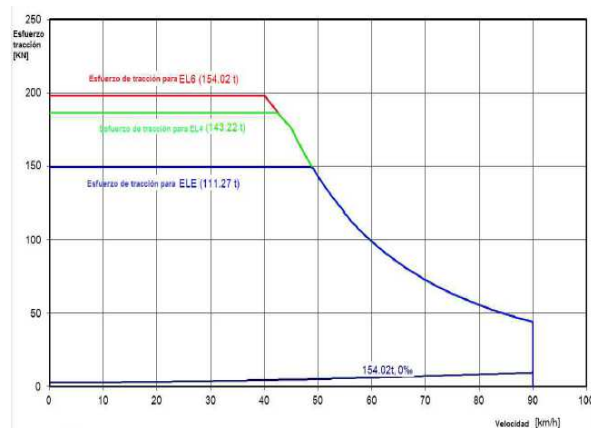


Figura 4.10 Corba de potència de la UT114. Font: Siemens.

Modelitzar el material rodant amb OpenTrack requereix la introducció de diferents variables, descrites en gran mesura en les taules i gràfics precedents. Dels valors esmentats, es consideren invariants durant el procés iteratiu els valors geomètrics (longituds, gàlibs) físics (pes, càrrega d'adherència i el factor de massa rotativa), mecànics (corba de potència), tanmateix, les propietats cinemàtiques descrites no tenen per què ser iguals a les utilitzades en les circulacions reals. Per tant, poden ser objecte de petites modificacions a fi d'obtenir un bon calibratge, concretament els paràmetres d'acceleració, frenada seran modelitzats d'acord amb les corbes espai-velocitat obtingudes de les mesures reals.

No obstant, per aquest procés cal entendre com interactua el programa amb cada un d'aquests paràmetres, a continuació es presenta, com el programa calcula la resistència del material rodant sobre la infraestructura modelitzada.

4.3 Especificacions de la interacció de la infraestructura i del material rodant.

OpenTrack, calcula la resistència a l'avanç del tren segons l'equació 4, on la resistència a la tracció es descriu com resistència a l'avanç del material rodant, i la resistència a l'acceleració es descriu com la resistència, positiva o negativa, produïda dels fenòmens d'acceleració i desacceleració.

$$R = R_F + R_a \quad (4)$$

Amb:	R:	Resistència total	[R] = N
	R _F :	Resistència tracció	[R _F] = N
	R _a :	Resistència acceleració	[R _a] = N

En primer terme es descriu el valor de la resistència a tracció (equació 5) que pot ser subdividida en la resistència del tren (material rodant) i la resistència per geometria (perfil de via).

$$R_F = R_L + R_{Str} \quad (5)$$

Amb:	R _F :	Resistència tracció	[R _F] = N
	R _L :	Resistència del tren	[R _L] = N
	R _{Str} :	Resistència per geometria	[R _{Str}] = N

En segon terme es descriu, el valor de la resistència generada pel propi material rodant en circulació (R_L), aquest es calcula segons l'equació 6 com la suma de la resistència generada per la locomotora (equació 7), la generada pels vagons (equació 8) i el pas per túnel, descrit anteriorment (equació 2).

$$R_L = R_{LT} + R_{Lp} + R_T \quad (6)$$

Amb:	R _L :	Resistència del tren	[R _L] = N
	R _{LT} :	Resistència de locomotora	[R _F] = N

R_{LP} :	Resistència del tren	$[R_L] = N$
R_T :	Resistència al túnel	$[R_L] = N$

Per al càlcul de la resistència de la locomotora es fa servir al fórmula d'Strahl. (equació 7). En aquest cas s'ha imposat una velocitat del vent de 0 m/s ja que no hi ha trams de via exposats a grans cops de vent i no es té constància de forts vents en el període de mesures. El factor de resistència és un paràmetre subjecte al calibratge, per la iteració 0 es proposa agafar el valor 3,30 que és el proposat per OpenTrack. Referent al coeficient de resistència és imposat pel software amb un valor de $0.3 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$.

$$R_{LT} = g \cdot \left\{ \left[f_L \cdot \frac{m}{1000} \right] + [k_{Stl} \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3,6^2)] \right\} \quad (7)$$

Amb:	R_{LT} :	Resistència de locomotora	$[R_F] = N$
	g :	Acceleració de la gravetat ($9,81 \text{ m/s}^2$)	$[g] = \text{m/s}^2$
	m :	Massa de la locomotora	$[m] = \text{kg}$
	v :	Velocitat del tren	$[v] = \text{m/s}$
	Δv :	Velocitat del vent	$[v] = \text{m/s}$
	f_L :	Factor de resistència	$[f_L] = \text{unitat}$
	k_{Stl} :	Coeficient de resistència	$[k_{Stl}] = \text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$

Per al càlcul de la resistència per a cotxes de passatgers s'utilitza la fórmula de Sauthoff. (equació 8). En aquesta ocasió els valors pels coeficients de resistència són 0.025 s/m i $0.00696 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$.

$$R_{LP} = g \cdot \left\{ \left[1.9 \cdot \frac{m}{1000} \right] + [k_{Sa1} \cdot v \cdot 3,6 \cdot \frac{m}{1000}] + [k_{Sa2} \cdot (n+2.7) \cdot 3,6 \cdot ((v + \Delta v) \cdot 3,6^2)] \right\} \quad (8)$$

Amb:	R_{LT} :	Resistència dels cotxes	$[R_F] = N$
	g :	Acceleració de la gravetat	$[g] = \text{m/s}^2$
	m :	Massa de cotxes	$[m] = \text{kg}$
	v :	Velocitat del tren	$[v] = \text{m/s}$
	Δv :	Velocitat del vent	$[v] = \text{m/s}$
	n :	Nombre de cotxes	$[n] = \text{unitat}$
	k_{Sa1} :	Coeficient de resistència	$[k_{Stl}] = \text{s/m}$
	k_{Sa2} :	Coeficient de resistència	$[k_{Stl}] = \text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$

Referent al valor de R_{Str} (equació 9), es tracte del valor de les sumes de resistències sorgides dels elements infraestructurals següents; resistència per gradient (equació 1), resistència per corba (equació 2) i resistència d'aparell de via, que és negligible, elements descrits en pàgines precedents.

$$R_{Str} = R_s + R_B + R_W \quad (9)$$

Amb:	R_{Str} :	Resistència per geometria	$[R_{Str}] = N$
	R_s :	Resistència per gradient	$[R_s] = N$
	R_B :	Resistència per corba	$[R_B] = N$
	R_W :	Resistència per agulla	$[R_W] = N$

Finalment el valor de la resistència de l'acceleració o desacceleració (equació 10) és proporcional a la massa d'aquest i la massa giratòria, per la qual cosa s'afegeix un factor empíric ρ .

$$R_a = m \cdot a \cdot (1 + 0,01 \cdot \rho) \quad (10)$$

Amb:	R_a :	Resistència per geometria	$[R_{str}] = N$
	a :	Acceleració	$[a] = m/s^2$
	m :	Massa del tren	$[m] = kg$
	ρ :	Factor de massa empíric	$[\rho] = \text{unitari}$

OpenTrack dona la possibilitat de triar la manera amb la que es vol modelitzar el valor de la desacceleració. Aquesta pot estar modelitzada per taules o en funció del percentatge potencial de frenada (equació 11).

$$a = -(C1 + C2 \cdot BWP) \quad (11)$$

Amb:	a :	Acceleració	$[a] = m/s^2$
	$C1$:	Coefficient independent	$[C1] = 1$
	$C2$:	Coefficient dependent	$[C2] = 1$
	BWP :	Percentatge frenada/pes	$[BWP] = 1$

Els coeficients $C1$ i $C2$ son valors tabulats. Per el cas que ens ocupa es proposa agafar els valors proposats per la UIC:

$$C1 = 0.069 \quad i \quad C2 = 0.006$$

4.4 Paràmetres del calibratge.

Un cop identificats les variables a modelitzar i introduir a OpenTrack es genera la taula 4.4 amb tots els paràmetres subjectes de ser calibrats, aquesta taula es modificarà conseqüentment amb els canvis que es considerin oportuns iteració a iteració. En aquesta taula consten els valors utilitzats per la iteració 0 o de referència.

Cal apuntar que alguns dels valors s'han establert com a fixes amb els següents criteris:

- ∴ Swich time, temps de canvi de les agulles (6 s).
- ∴ Sight, distància a la qual el material rodant detecta els senyals (400 m).
- ∴ Propietats geomètriques del material rodant (gàlibs, longitud...).
- ∴ Propietats físiques del material (pesos)
- ∴ Velocitat màxima, capada a 90 km/h.
- ∴ Corba d'esforç màxima del material rodant.
- ∴ Tipus de tren: commuter.
- ∴ Equació resistència per gradient i corba.

Els altres paràmetres seran objecte de calibratge durant el procés iteratiu, la modificació dels mateixos serà conseqüència de l'anàlisi de les corbes espai-velocitat i els temps de recorregut. S'estableixen uns marges de tolerància acceptables per aquests paràmetres, d'acord amb el manual del programari.

- ∴ Adherència: 80-150%.
- ∴ Factor túnel: doble/single rough/smooth.
- ∴ "Performance": 80-100%.
- ∴ Temps mínim de sustentació de velocitat 0s \pm 10 s.
- ∴ Acceleració màxima: $1,15 \pm 0,2 \text{ m/s}^2$
- ∴ Resistance factor: 3,3 (valor per defecte) \pm 2.
- ∴ Corba de frenada: tabulada (per defecte)/fórmula BWP.
- ∴ Equació de resistència Strahl, recomenat per serveis de passatgers.
- ∴ Factor de massa rotativa: $1,08 \pm 0,1$.

		Paràmetre	Iteració 0	Unitats	Caràcter
Infraestructura	Oth.	Swich Time	6	[s]	Fixe
		Sight	400	[m]	Fixe
	Tunnels	Adhesion	good (125%)	-	Calibrable
		Adhesion Tunnel	good (125%)	-	Calibrable
		Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 1	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 2	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 3	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 4	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 5	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable
		Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough	-	Calibrable

Taula 4.4a Paràmetres potencialment calibrables. Font: Elaboració pròpia.

Taula basada en els inputs descrits pel manual d'OpenTrack.

		Paràmetre	Iteració 0 UT113	Iteració 0 UT114	Unitats	Caràcter
Material Rodant	Train	Type	Commuter	Commuter	-	Fixe
		Load	143	111	[t]	Fixe
		Adh. Load	111	111	[t]	Fixe
		Len.	80	60	[m]	Fixe
		Trailers	4	3	[unitari]	Fixe
		Speed Max	90	90	[km/h]	Fixe
		Tractive Effort màx	215	215	[kN]	Fixe
		Resist. Factor	3,3	3,3	[unitari]	Calibrable
		Rot Mass Factor	1,08	1,08	[unitari]	Calibrable
		Balise Telegram	YES	YES	-	Fixe
		Loop Telegram	YES	YES	-	Fixe
		Radio Telegram	YES	YES	-	Fixe
		Rack Traction	NO	NO	-	Fixe
		Equation Rolling	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	-	Calibrable
		Starting resistance	0	0	[kN]	Fixe
		Equation Gradient	Distributed Mass per Train	Distributed Mass per Train	-	Fixe
		Equation Curve	Roeckl Formula Standard Gauge	Roeckl Formula Standard Gauge	-	Fixe
		Percentatge (correction)	100	100%	[%]	Fixe
		Min. Time Hold Speed	0	0	[s]	Calibrable
		Adhesion	YES	YES	-	Calibrable
		Adhesion bad	80	80	[%]	Calibrable
		Adhesion normal	125	125	[%]	Calibrable
		Adhesion good	150	150	[%]	Calibrable
	Engine	Max. Acc	1,1	1,1	[m/s ²]	Calibrable
		Desacceleration Function	Default	Default	-	Calibrable
		Desacceleration Prop	-1,1	-1,1	[m/s ²]	Calibrable
		Correct Deceleration on gradients	NO	NO	-	Calibrable
		<i>Traction-Speed Diagram</i>				
		Speed	42,5/90	49/90	[km/h]	Fixe
		Tractive Effort	215/50	150/45	[kN]	Fixe
		Graph Type	hyperb	hyperb	-	Fixe
		Performance Distribution	100	100	[%]	Calibrable

Taula 4.4b Paràmetres potencialment calibrables. Font: Elaboració pròpia.

Taula basada en els inputs descrits pel manual d'OpenTrack

4.5 Moviments i mesures de referència.

L'abast d'aquest projecte es limita al calibratge del model generat a partir dels elements descrits en les pàgines precedents, per tant cal establir un marc de referència amb dades obtingudes de circulacions reals amb condicions de contorn concretes que permetin obtenir els temps de recorregut tècnics actuals.

El valor final d'aquests temps mínim ve donat per: (Cantero, 2014)

- ∴ La conducció del tren per part del maquinista.
- ∴ Les prestacions del material motor.
- ∴ L'alimentació del corrent de tracció.
- ∴ L'adherència.
- ∴ La resistència del material remolcat per les seccions de la línia.
- ∴ La velocitat permesa pel traçat.

Les esmentades circulacions es varen realitzar en horari nocturn, sense possible interacció amb altres trens, veient tots els discs en verd, circulant sempre a velocitat màxima permesa per els sistemes de senyalització, realitzades pel mateix maquinista i en el període d'un mes per disminuir el factor climàtic, ja que aquest té influència directa sobre l'adherència (Álvarez, 2006). Per tant, aquests temps obtinguts no són comparables amb els temps de recorregut en règim comercial.

El temps d'estacionament no té influència en el càlcul dels temps de recorregut mínims, no obstant per estandarditzar els assajos s'ha establert un temps d'estacionament de 20 segons.

Respecta el material rodant utilitzat, s'han emparat UT113 per la totalitat dels moviments excepte els corresponents al ramal Tibidabo (moviments 2.1 i 2.2). Per tant, aquestes dues sèries seran amb les quals es realitzaran les simulacions; com s'ha comentat els resultats obtinguts per les UT113 són extrapolables als de les UT112.

Els temps de recorregut obtinguts de les mesures reals és condicionat directament per la conducció realitzada pel maquinista i per tant, les mesures estan subjectes al factor humà. Conseqüentment, cal fer una anàlisi comparatiu de cada mesura amb la infraestructura vigent i comprovar que la corba espai-velocitat corresponent a la marxa real en qüestió s'ajusta a la hipotètica corba optima. En els casos on no s'hagi circulat al màxim es repetiran les mesures fins a aconseguir els resultats òptims.

Cal esmentar que, el factor humà, tot i ser un factor condicionant, a la línia Barcelona-Vallès té una variabilitat reduïda en la conducció en comparació amb altres sistemes ferroviaris per tres motius principals:

- ∴ La senyalització en cabina acota força el rang de velocitats possibles en cada circuit elèctric.
- ∴ L'empresa forma el seu propi personal de conducció (tots reben el mateix coneixement).
- ∴ Al ser una infraestructura petita els maquinistes realitzen constantment (al llarg del dia i del any) el mateix recorregut. Per això tenen una conducció molt fina i homogènia.

A criteri de FGC s'han seleccionat els moviments convenients que calia realitzar les esmentades circulacions per avaluar l'impacte de les diferents potencials polítiques d'aturades. A continuació es mostren (taules 4.5-4.12) els itineraris en qüestió realitzats d'on s'han obtingut els temps tècnics de referència.

Sentit ascendent.

Moviment	Moviment 1.3	Moviment 1.5	Moviment 1.7	Moviment 3.3	Moviment 3.5	Moviment 3.7	Moviment 6.3	Moviment 6.5
Itinerari	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades
PC	X (Via 2)	X (Via 3)		X (Via 2)	X (Via 5)			
PR	X	X		X	X			
GR	X	X		X	X			
SG	X	-		X	X			
MN	X	X		X	X			
BN	X	-		-	X			
TT	X	-		X	-			
SR	X	X	X	X	X	X	X	X
PF	X	-	X	-	-	-	X	-
VL	X	-	-	-	-	X	-	X
LP	X	-	X	-	X	-	X	-
LF	X	X	-	-	-	X	X	-
VD	X	X	-	X	X	-	X	X
SC	X	X	X	X	X	X	X	X

Taula 4.5 Moviments pel tram Plaça Catalunya - Sant Cugat en sentit ascendent. Font: FGC.



El moviment efectua parada



El moviment no efectua parada

	Moviment 2.1
Itinerari	Parades
TB	X
EP	X
PD	X
PM	X
GR	X
PR	X
PC	X (via 1)

Taula 4.6 Moviments per la branca Av. Tibidabo en sentit ascendent Font: FGC.

	Moviment 4.3	Moviment 4.5	Moviment 4.7	Moviment 4.9
Itinerari	Parades	Parades	Parades	Parades
VD (via 1)	X			
SC	X			
VO	X	X (via 2)		
SJ	X	X		
BT	X	-	X	X
UN	X	X	X	X
SQ	X	X	-	-
CF	X	-	-	X
PJ	X	X	X	X
CT	X	X (via 2)	X (via 2)	-
NO	X			-
PN	X (via 1)			X (via 2)

Taula 4.7 Moviments pel tram Valldoreix – Parc del Nord ascendent. Font: FGC.

	Moviment 5.3	Moviment 5.5	Moviment 5.7
Itinerari	Parades	Parades	Parades
VD	X	X	X (via 2)
SC	X	X	X
MS	X	-	-
HG	X	X	-
RB	X	X	X
FN	X	-	X (via 2)
TR	X	X	
VP	X	X (via 2)	
EN	X		
NA	X		

Taula 4.8 Moviments pel tram Valldoreix – Nacions Unides. en sentit ascendent. Font: FGC.

Sentit descendent.

	Moviment 1.2	Moviment 1.4	Moviment 1.6	Moviment 3.2	Moviment 3.4	Moviment 3.6	Moviment 6.2	Moviment 6.4
Itinerari	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades	Parades
SC	X	X	X	X	X	X	X	X
VD	X	X	-	X	X	-	X	X
LF	X	X	-	-	-	X	X	-
LP	X	-	X	-	X	-	X	-
VL	X	-	-	-	-	X	-	X
PF	X	-	X	-	-	-	X	-
SR	X	X	X	X	X	X	X	X
TT	X	-		X	-			
BN	X	-		-	X			
MN	X	X		X	X			
SG	X	-		X	X			
GR	X	X		X	X			
PR	X	X		X	X			
PC	X (Via 2)	X (Via 3)		X (Via 4)	X (Via 5)			

Taula 4.9 Moviments pel tram Sant Cugat – Plaça Catalunya en sentit descendent. Font: FGC.

	Moviment 2.2
Itinerari	Parades
PC	X (via 1)
PR	X
GR	X
PM	X
PD	X
EP	X
TB	X

Taula 4.10 Moviments per la branca Av. Tibidabo en sentit descendent. Font: FGC.

	Moviment 4.2	Moviment 4.4	Moviment 4.6	Moviment 4.8
Itinerari	Parades	Parades	Parades	Parades
PN	X (via 2)			X (via 2)
NO	-			X
CT	X	X	X	X
PJ	X	X	X	X
CF	-	-	X	X
SQ	X	-	-	X
UN	X	X	X	X
BT	-	X	X	X
SJ	X			X
VO	X (via 2)			X
SC				X (via 2)
VD				X (via 1)

Taula 4.11 Moviments pel tram Parc del Nord – Valldoreix en sentit descendent. Font: FGC.

	Moviment 5.2	Moviment 5.4	Moviment 5.6
Itinerari	Parades	Parades	Parades
NA	X (via 2)		
EN	X		
VP	X	X (via 2)	
TR	X	X	
FN	X	-	X (via 2)
RB	X	X	X
HG	X	X	-
MS	X	-	-
SC	X (via 2)	X	X
VD	X (via 1)	X (via 2)	X (via 2)

Taula 4.12 Moviments pel tram Nacions Unides - Valldoreix. en sentit descendent. Font: FGC.

Un cop realitzada la planificació dels moviments, es procedeix a realitzar les mesures dels temps de recorregut tècnics reals en les condicions detallades anteriorment. A l'annex 1 es mostren els resultats de tots els moviments previstos més les repeticions d'alguns d'aquests perquè el resultat no s'ha considerat adequat.

Anàlisi dels resultats.

Com s'ha comentat, els resultats obtinguts de les circulacions nocturnes estan subjectes al factor humà i per tant aquestes mesures requereix revisió amb l'objectiu de poder discernir si el temps obtingut s'ajusta al potencial temps mínim de recorregut. Per aquesta anàlisi s'ha comparat les diferents corbes espai-velocitat amb la infraestructura vigent. A continuació (figura 4.11 i 4.12) es mostren exemples de gràfics espai-velocitat on s'han detectat situacions puntuals on el temps de recorregut és potencialment optimitzable.

Adicionalment cal esmentar que la velocitat màxima real serà sempre igual o inferior a la velocitat màxima permesa per la infraestructura. Per altra banda, és una empresa molt complicada, per part del personal de conducció, aconseguir unes marxes òptimes pel procés de calibratge on el temps de recorregut sigui mínim.

En alguns casos la corba de desacceleració presenta perfils poc homogenis i menys agressius que la potencial frenada màxima. D'aquesta manera es proporcionen temps de recorregut diferent dels estimats mínims. A tall d'exemple es mostra la millor corba de frenada obtinguda a l'entrada de Sant Cugat en sentit ascendent procedent del moviment 5 del dia 3 amb la corba de frenada procedent del moviment 3 del dia 1 i del moviment 5 del dia 1.

En la figura 4.11 es mostra la comparativa entre les tres frenades esmentades i a la taula 4.13 es mostren els temps de recorregut per cada un dels moviments. S'observa que:

1. La corba corresponent al moviment 2 del dia 5 presenta una velocitat màxima més sostinguda.
2. Totes les corbes frenen força abans de la limitació de 55 km/h, tot i així el moviment 2 del dia 5 és la que frena amb menys antelació.
3. En el tram final de la frenada és el moviment 3 del dia 5 el perfil que proporciona una frenada més agressiva.

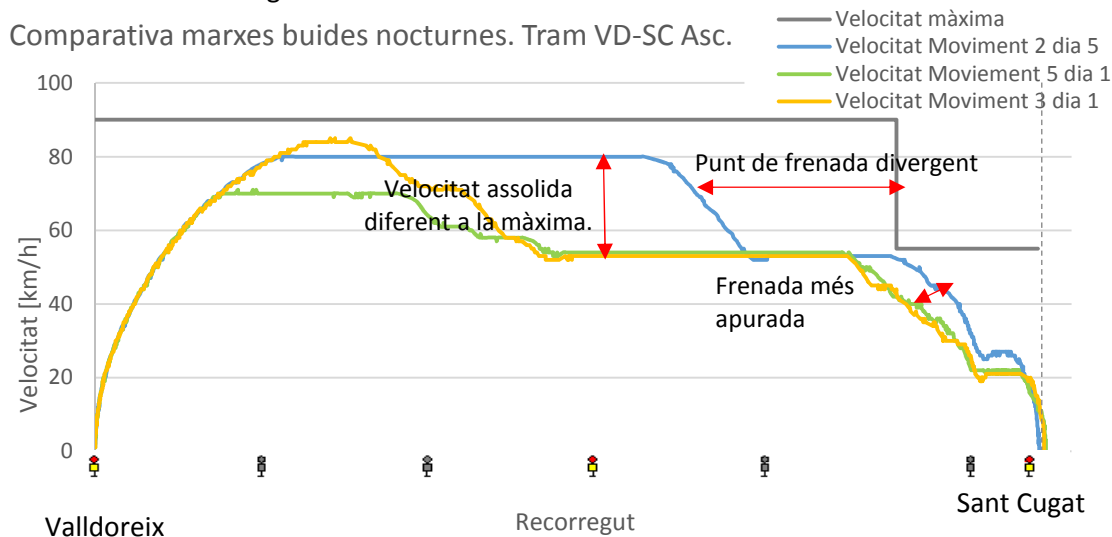


Figura 4.11 Corba frenada d'entrada a Sant Cugat ascendent. Font: elaboració pròpia.

	Dia 1 3	Dia 1 5	Dia 5 2
LF	0:02:58	0:07:55	
VD (via 1)	0:01:38	0:01:44	sortida
SC (via 1)	0:01:52	0:01:56	0:01:36

Taula 4.13 Abstracte de la taula 4.15 amb els temps de recorregut dels moviments estudiats. Font: FGC i elaboració pròpia.

Pels motius exposats anteriorment el millor temps de recorregut és pel moviment 2 del dia 5 i, per tant, l'agafat com a temps de referència, tot i així es preveu que aquest temps podria ser inferior, ja que s'estima que la velocitat màxima serà superior així com la corba de frenada més agressiva i a menys distància de la limitació.

Per altra banda, com s'ha comentat anteriorment, a vegades s'incorporen limitacions temporals de velocitat. És el cas del túnel 4, on per motius de manteniment, durant la campanya de mesures, hi havia una limitació temporal de velocitat (LTV) de 50 km/h en sentit descendent entre les estacions de Peu del Funicular i Baixador de Vallvidrera. Tal com es mostra a la figura 4.12, corresponent al moviment 2 del dia 7, on s'aprecia que l'impacte a conseqüència de la LTV generant temps de recorregut superiors als estimats.

Aquesta LTV era de tipus mòbil, és a dir, la seva localització variava en funció d'on es realitzaven els treballs de manteniment. En conseqüència s'estima que l'impacte de la limitació sobre els temps de recorregut reals sigui desigual en funció del dia en què es van prendre les mesures.

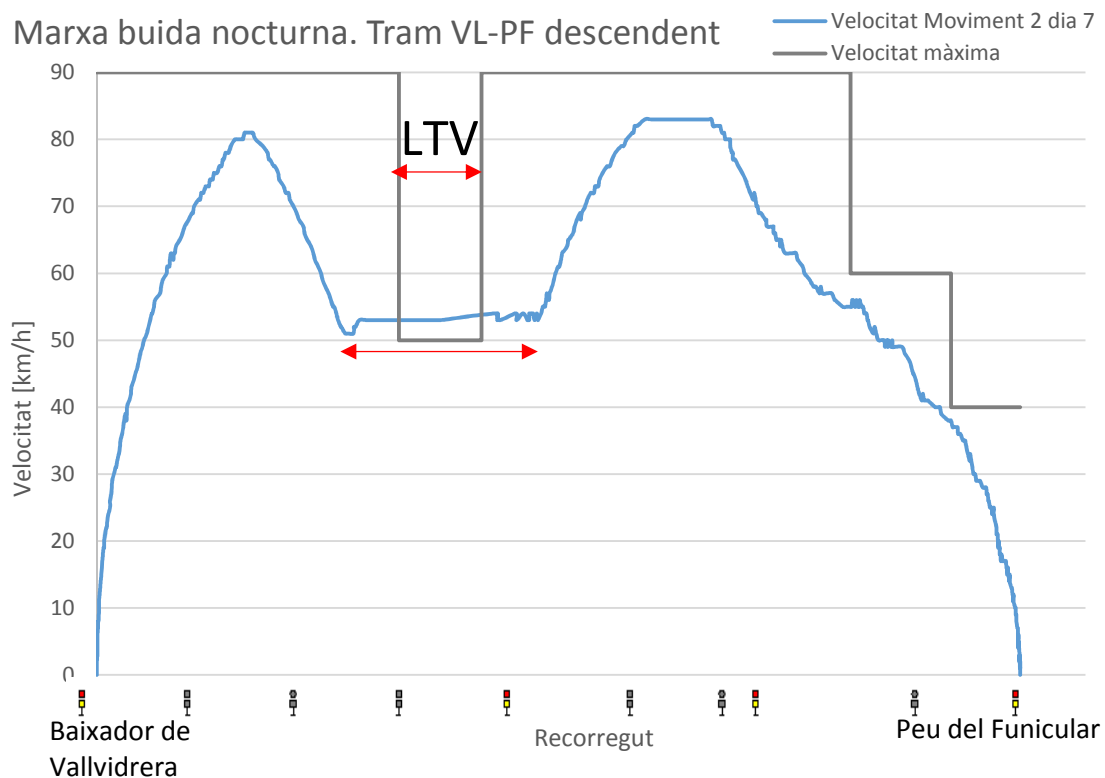


Figura 4.12 Corba espai-velocitat entre les estacions de Baixador de Vallvidrera i Peu del Funicular en sentit descendent. Font: elaboració pròpia.

Durant la campanya de mesures, a part de la LTV comentada, n'hi havia una altra instal·lada entre les estacions de Sant Cugat i Volpalleres en sentit ascendent limitant la velocitat a 30 km/h. En aquest cas també es poden generar discrepàncies entre els temps simulats i les mesures reals. Cal remarcar que, l'objectiu del present estudi és aconseguir uns temps mínims de recorregut i no la modelització d'una marxa concreta, per tant les LTV no seran modelitzades.

A continuació (taules 4.14-4.23) es presenten els temps tècnics sorgits de l'anàlisi de les marxés tècniques nocturnes, aquestes taules seran el marc de referència, pel calibratge del model. Per tant, aquests moviments constitueixen els solcs bàsics amb la política d'aturades corresponent, subjecte a ser modelitzats en OpenTrack.

Cal apuntar que els temps presentats són els temps de recorregut entre els punts indicats en cada cas sense tenir en compte el temps de parada.

Per facilitar-ne la visualització s'han discernit els temps de recorregut per trams.

Tram Plaça Catalunya Sarrià.

Ascendent	TDR Real	TDR Real
PC via 1 - PR	0:01:54	0:01:54
PC via 2 - PR	0:01:53	0:01:53
PC via 3 - PR	0:01:53	0:01:53
PC via 4 - PR	0:01:51	0:01:51
PC via 5 - PR	0:01:51	0:01:51
PR - GR	0:01:11	0:01:11
GR - SG	0:00:50	I
SG - MN	0:00:47	0:01:23
MN - BN	0:00:51	I
BN - TT	0:00:48	I
TT - SR	0:01:04	0:02:05

Descendent	TDR Real	TDR Real
SR - TT	0:01:03	I
TT - BN	0:00:47	I
BN - MN	0:00:49	0:02:04
MN - SG	0:00:56	I
SG - GR	0:00:48	0:01:26
GR - PR	0:01:21	0:01:21
PR - PC via 1	0:02:04	0:02:04
PR - PC via 2	0:02:03	0:02:03
PR - PC via 3	0:02:08	0:02:08
PR - PC via 4	0:02:10	0:02:10
PR - PC via 5	0:02:12	0:02:12

Taula 4.14 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya - Sarrià , sentit ascendent. Font: FGC.

Taula 4.15 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya - Sarrià , sentit descendent. Font: FGC.

Tram Plaça Catalunya – Avinguda Tibidabo

Ascendent	TDR Real
PC via 1 - PR	0:01:53
PR - GR via 3	0:01:32
GR - PM	0:01:13
PM - PD	0:00:45
PD - EP	0:00:49
EP - TB	0:01:04

Descendent	TDR Real
TB - EP	0:00:58
EP - PD	0:00:46
PD - PM	0:00:45
PM - GR via 4	0:01:04
GR - PR	0:01:23
PR - PC via 1	0:02:04

Taula 4.16 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Av. Tibidabo , sentit ascendent. Font: FGC.

Taula 4.17 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Av. Tibidabo , sentit descendent. Font: FGC.

Tram Sarrià – Sant Cugat

Ascendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real	TDR Real	TDR Real
SR - PF	0:02:56				
PF - VL	0:01:42				
VL - LP	0:01:08		0:05:03		
LP - LF	0:02:58		0:02:58		0:07:43
LF - VD	0:01:38		0:01:38	0:08:57	0:01:38
VD - SC	0:01:36	0:10:03	0:01:36	0:01:36	0:01:36

Taula 4.18 Temps de recorregut tècnics pel tram Sarrià – Sant Cugat , sentit ascendent. Font: FGC.

Descendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real	TDR Real	TDR Real
SC - VD	0:01:28		0:01:28	0:01:28	0:01:28
VD - LF	0:01:45		0:01:45		0:01:45
LF - LP	0:02:59		0:02:59		
LP - VL	0:01:07				
VL - PF	0:01:53				
PF - SR	0:03:05	0:10:42	0:05:40	0:09:31	0:08:12

Taula 4.19 Temps de recorregut tècnics pel tram Sarrià – Sant Cugat , sentit descendent. Font: FGC.

Tram Sant Cugat – Nacions Unides

Ascendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real
SC - MS	0:01:48		
MS - HG	0:01:29		0:02:53
HG - RB	0:01:44	0:04:11	0:01:44
RB - FN	0:04:03		
FN - TR	0:03:31	0:07:08	0:07:08
TR - VP	0:01:56	0:01:56	0:01:56
VP - EN	0:01:15	0:01:15	0:01:15
EN - NA	0:01:50	0:01:50	0:01:50

Taula 4.20 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Nacions Unides , sentit ascendent. Font: FGC.

Descendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real
NA - EN	0:01:42	0:01:42	0:01:42
EN - VP	0:01:17	0:01:17	0:01:17
VP - TR	0:02:00	0:02:00	0:02:00
TR - FN	0:03:23		
FN - RB	0:04:01	0:06:59	0:06:59
RB - HG	0:01:43		0:01:43
FG - MS	0:01:32		
MS - SC	0:02:01	0:04:19	0:03:04

Taula 4.21 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Nacions Unides , sentit descendent. Font: FGC.

Tram Sant Cugat – Parc del Nord

Ascendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real
SC - VO	0:01:47	0:01:47	0:01:47
VO - SJ	0:01:15	0:01:15	0:01:15
SJ - BT	0:01:39	I	I
BT - UA	0:01:39	0:03:00	0:03:00
UA - SQ	0:03:13	I	I
SQ - CF	0:02:00	I	0:04:58
CF - PJ	0:01:18	0:05:43	0:01:18
PJ - CT	0:01:17	0:01:17	0:01:17
CT - NO	0:01:03	0:01:03	0:01:03

Taula 4.22 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Sabadell-Nord , sentit ascendent. Font: FGC.

Descendent	TDR Real	TDR Real	TDR Real
PN - NO	0:01:42	0:01:42	0:01:42
NO - CT	0:01:02	0:01:02	0:01:02
CT - PJ	0:01:16	0:01:16	0:01:16
PJ - CF	0:01:20	I	0:01:20
CF - SQ	0:01:44	I	I
SQ - UA	0:03:14	0:05:47	0:04:36
UA - BT	0:01:41	I	I
BT - SJ	0:01:34	0:02:55	0:02:55
SJ - VO	0:01:14	0:01:14	0:01:14
VO - SC	0:01:56	0:01:56	0:01:56

Taula 4.23 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Sabadell Nord , sentit descendent. Font: FGC.

4.6 Model final.

Amb els inputs descrits anteriorment es bolca la informació al software, generant un model virtual de la infraestructura (figura 4.13), del material rodant condicionat per les particularitats en la conducció per part del personal i dels itineraris amb la política d'aturades corresponents. En aquest model es mostren en forma de vèrtex els punts singulars de la xarxa on canvia la geometria o la senyalització. Cal remarcar que en la representació gràfica d'aquest model digital les distàncies no estan a escala, ja que la longitud física de cada segment no correspon amb l'atribut longitud que se li assigna.

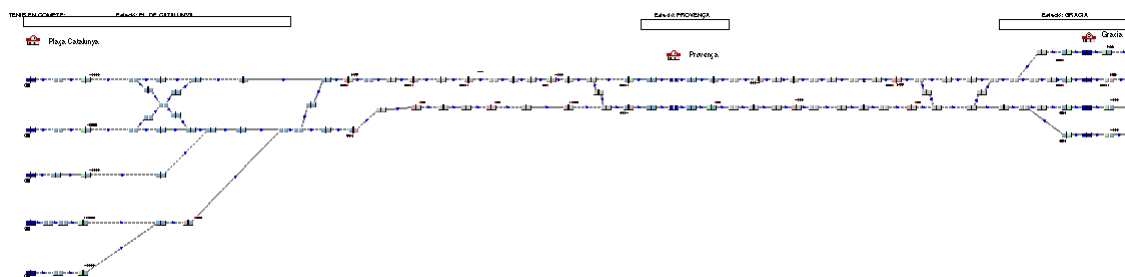


Figura 4.13a Fragment del model virtual de la línia Barcelona-Vallès generat amb OpenTrack. Tram Plaça Catalunya - Gràcia. Font: elaboració pròpia.

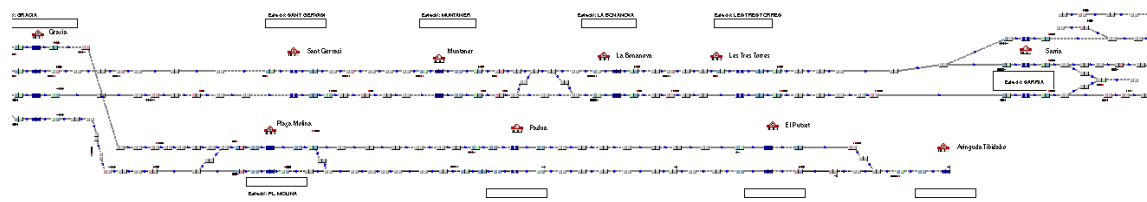


Figura 4.13b Fragment del model virtual de la línia Barcelona-Vallès generat amb OpenTrack. Tram Gràcia-Sarrià i branca del Tibidabo. Font: elaboració pròpia.

Per una banda, amb els resultats obtinguts de les marxes tècniques i per l'altre el model introduït a OpenTrack, es disposa a començar a fer les simulacions pertinents i ajustar els paràmetres necessaris per tal d'obtenir uns temps de recorregut simulats dins d'una tolerància.

5. Resultats del calibratge

5.1 Metodologia

Tal com mostra la figura 5.1 el calibratge d'una eina com un simulador de marxes tècniques es tracta d'un procés iteratiu on, a partir de la comparació entre els temps reals obtinguts de les circulacions nocturnes i els temps simulats, s'ajusten els paràmetres del programa per tal d'obtenir uns resultats acceptables.

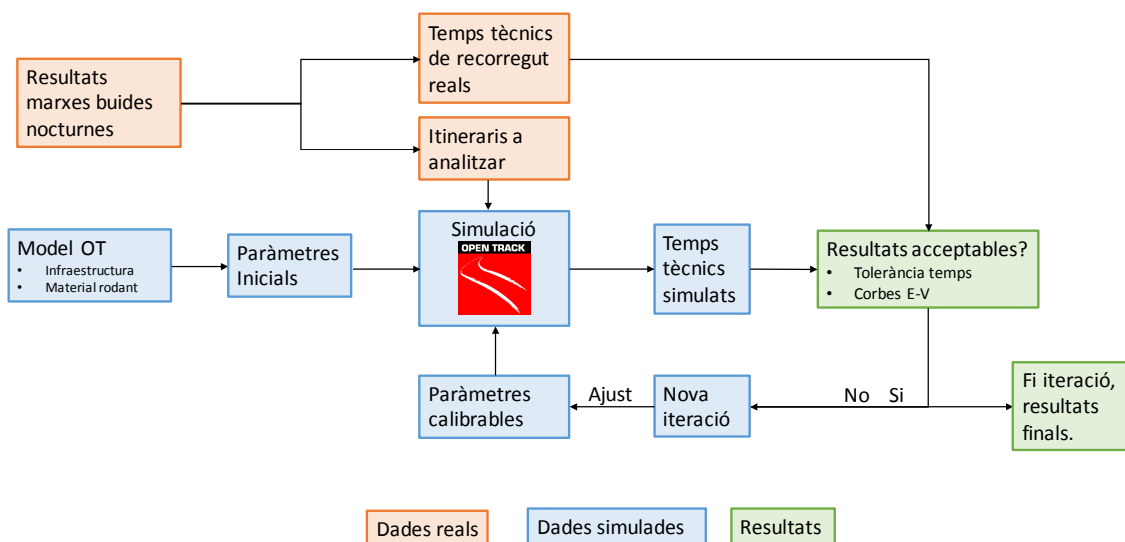


Figura 5.1 Esquema del procés iteratiu de calibratge. Font: elaboració pròpia.

Acceptació dels resultats

OpenTrack és capaç de calcular les marxes amb una precisió de dècimes de segon, no obstant, aquesta precisió manca de sentit físic en el dia a dia de l'explotació dels sistemes ferroviaris i per aquest motiu es procedeix a un arrodoniment al segon.

No obstant, la tolerància per les mesures reals obtingudes ve condicionada pel factor humà. Per aquest motiu es proposa una tolerància amb sentit físic (valors mínims realistes), aquesta queda fixada en $\pm 5s$.

Comparativa corba espai-velocitat

Adicionalment d'establir el criteri de tolerància per a desertitzar si el temps simulat és acceptable o no, es fa una comparació de la corba espai-velocitat real i simulada. A l'analitzar aquestes corbes es pot discernir la causa de determinats fora de tolerància, el que dona una pista del paràmetre a modificar per aconseguir un calibratge més rigorós i precís.

5.2 Procés iteratiu de calibratge

Per a la presentació dels resultats del procés de calibratge es mostren les fitxes corresponents a la primera, cinquena i última iteració amb tota la informació rellevant obtinguda de la simulació contrastada amb les dades reals procedents de les mesures realitzades. S'emplaça al lector a l'annex 2 on estan recollits els temps de recorregut de cada una de les iteracions realitzades, així com els paràmetres modificats en cada una de les iteracions.

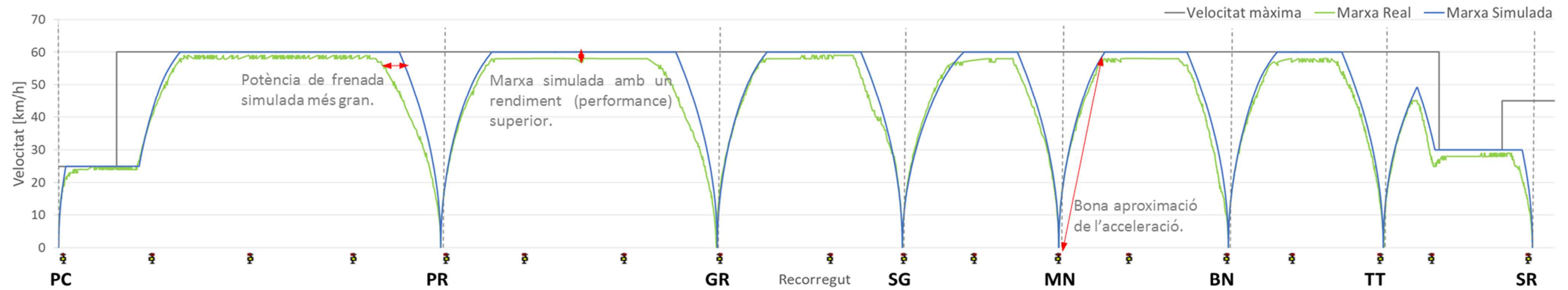
En cada una de les fitxes s'hi troba:

- ∴ Gràfiques espai-velocitat en sentit ascendent i descendent, on es compara la corba real amb l'obtinguda de la simulació. Es sobreprimeixen les observacions realitzades al respecte.
- ∴ Taula comparativa dels temps de recorregut (real i simulat) en el tram d'estudi, així com la diferència (real menys simulat) i la política d'aturades que, en el cas del procés de calibratge, els trens s'aturen sempre a totes les estacions.
- ∴ Taula de paràmetres per aquella iteració.
- ∴ Modificacions respecte a la iteració precedent.
- ∴ Observacions respecte a les gràfiques espai-velocitat i les taules amb els temps de recorregut.
- ∴ Propostes en la modificació dels paràmetres per la següent iteració.
- ∴ Conclusions.

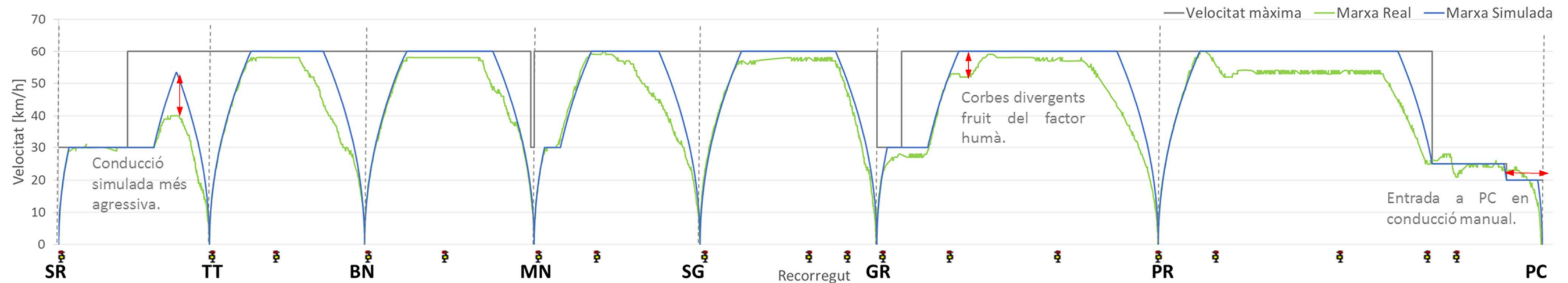
Cal comentar que, a fi de facilitar la visualització dels resultats es fragmenta la línia en diferents trams. El primer de Plaça Catalunya fins a Sarrià, el segon la branca d'Avinguda Tibidabo, el tercer des de Sarrià fins a Sant Cugat i els dos darrers corresponent a les branques de Terrassa i Sabadell respectivament.

Iteració 0. Tram PC-SR

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:51	0:01:45	0:00:06
PR - GR	0:01:11	0:01:07	0:00:04
GR - SG	0:00:50	0:00:50	0:00:00
SG - MN	0:00:47	0:00:47	0:00:00
MN - BN	0:00:51	0:00:47	0:00:04
BN - TT	0:00:48	0:00:45	0:00:03
TT - SR	0:01:04	0:00:59	0:00:05
Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - TT	0:01:03	0:00:59	0:00:04
TT - BN	0:00:47	0:00:44	0:00:03
BN - MN	0:00:49	0:00:47	0:00:02
MN - SG	0:00:56	0:00:49	0:00:07
SG - GR	0:00:48	0:00:49	0:00:01
GR - PR	0:01:21	0:01:15	0:00:06
PR - PC via 2	0:02:03	0:01:57	0:00:06

Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

Paràmetre	Iteració 0
Adhesion	good (125%)
Adhesion Tunnel	good (125%)
Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
Túnel 1	Tunnel Double, Rough
Túnel 2	Tunnel Double, Rough
Túnel 3	Tunnel Double, Rough
Túnel 4	Tunnel Double, Rough
Túnel 5	Tunnel Double, Rough
Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough
Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough

Modificacions

∴ Al ser la iteració de referència no hi han modificacions respecte l'anterior.

Observacions

1. Corbes de frenada simulades millors que les reals.
2. Temps tolerables en sentit ascendent.
3. Alguns temps fora de la tolerància en sentit descendent.
4. Temps simulats majoritàriament més ràpids.
5. Conducció simulada molt agressiva, no realista en el dia a dia.

Propostes de millora per pròxima iteració

- ∴ Reduir el rendiment (performance) de la UT113.
- ∴ Modificar la corba de frenada, reduir el potencial.
- ∴ Augmentar el temps "Min. Time hold speed".

Conclusions

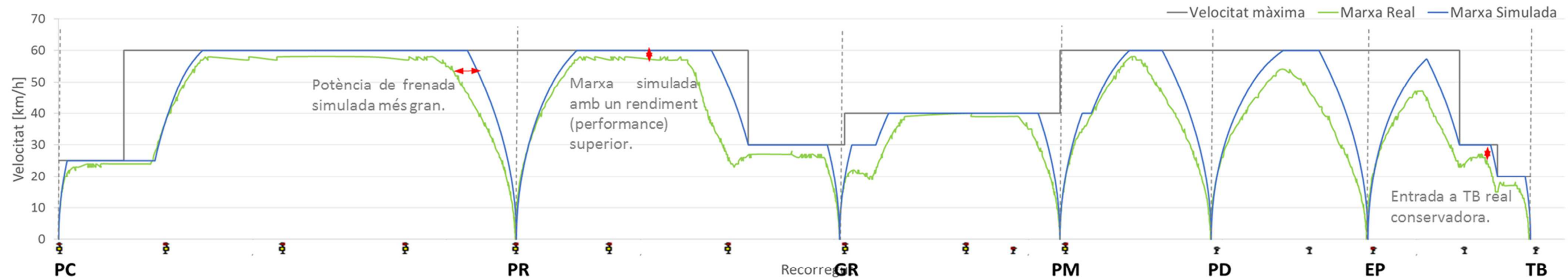
∴ No s'accepten cap dels temps simulats

- Material rodant es considera mal modelitzat.
- L'agressivitat de la conducció no és congruent amb la realitat.

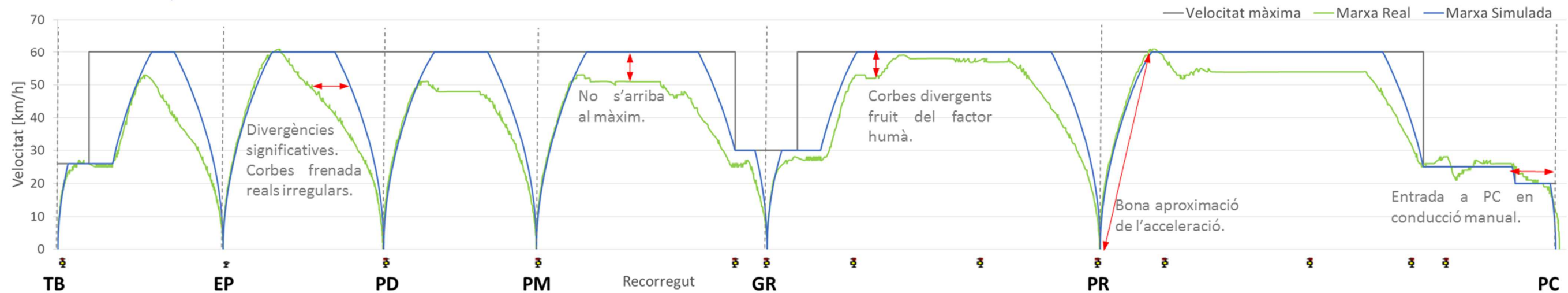


Iteració 0. Tram PC-TB

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:51	0:01:46	0:00:05
PR - GR via 3	0:01:32	0:01:23	0:00:09
GR - PM	0:01:13	0:01:04	0:00:09
PM - PD	0:00:45	0:00:42	0:00:03
PD - EP	0:00:49	0:00:46	0:00:03
EP - TB	0:01:04	0:00:58	0:00:06

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
TB - EP	0:00:58	0:00:52	0:00:06
EP - PD	0:00:46	0:00:41	0:00:05
PD - PM	0:00:45	0:00:39	0:00:06
PM - GR via 4	0:01:04	0:00:55	0:00:09
GR - PR	0:01:23	0:01:16	0:00:07
PR - PC via 1	0:02:04	0:01:58	0:00:06

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 0
	Oth.	
Infraestructura	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodant	Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough

Paràmetre	Iteració 0
Performance	100,0%
Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
Resist. Factor	3,3
Rot Mass Factor	1,08
Percentage (correction)	100%
Max. Acc	1,1
Min. Time Hold Speed	0 s
Deceleration Function	Default
Desacceleration Prop	-1,1 m/s ²
Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Al ser la iteració de referència no hi han modificacions respecte l'anterior.

Observacions

1. Corbes de frenada simulades millors que les reals.
2. Tram TB-GR descendent i PM-TB ascendent no s'arriba a la velocitat màxima.
3. Temps fora de la tolerància en ambdós sentits.
4. Tots els temps simulats més ràpids que els reals.
5. Corbes divergents a l'entrada de TB ascendent, i en sentit descendent.

Propostes de millora per pròxima iteració

- ∴ Reduir el rendiment (performance) de la UT114.
- ∴ Modificar la corba de frenada, reduir el potencial.

Conclusions

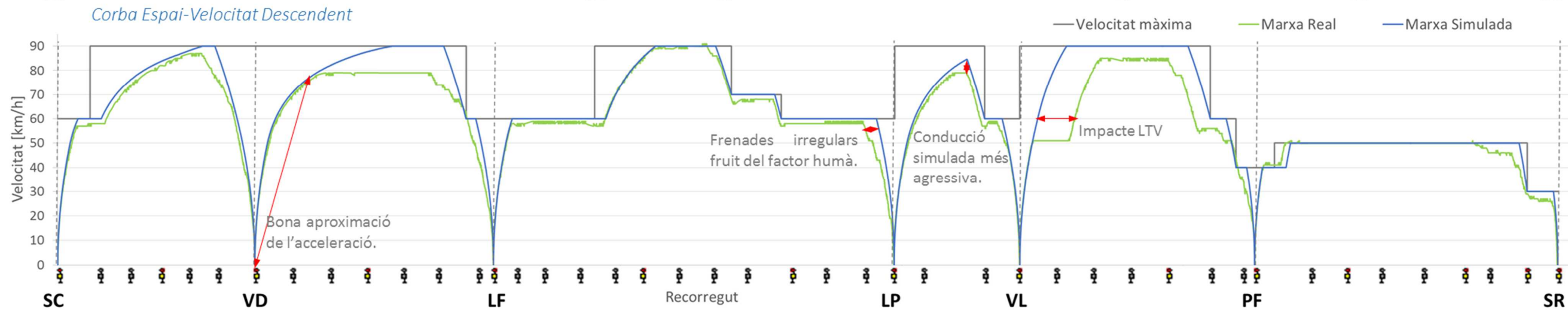
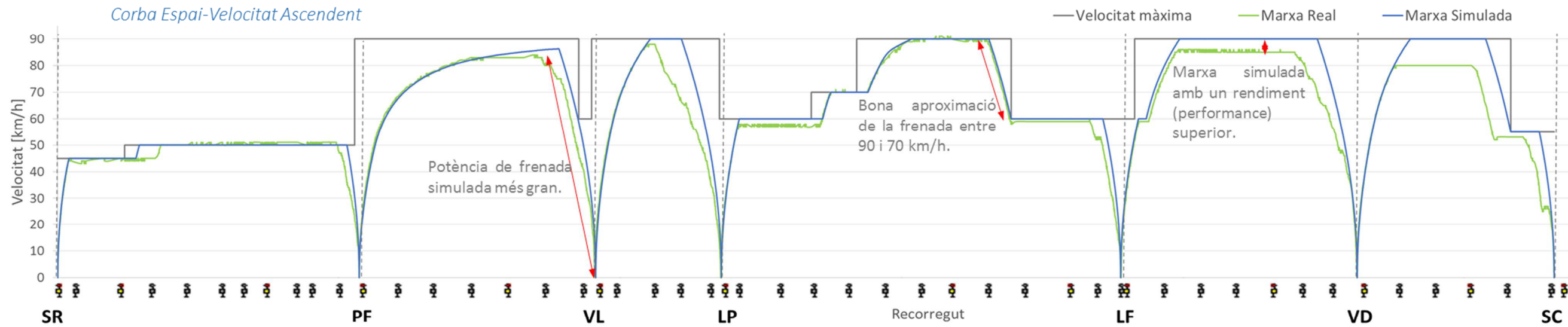
∴ No s'accepten cap dels temps simulats

- Material rodant es considera mal modelitzat.
- L'agressivitat de la conducció no és congruent amb la realitat.

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0



Iteració 0. Tram SR-SC



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF	0:02:56	0:02:53	0:00:03
PF - VL	0:01:42	0:01:41	0:00:01
VL - LP	0:01:08	0:01:00	0:00:08
LP - LF	0:02:58	0:02:48	0:00:10
LF - VD	0:01:38	0:01:33	0:00:05
VD - SC	0:01:36	0:01:25	0:00:11

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:26	0:00:02
VD - LF	0:01:45	0:01:37	0:00:08
LF - LP	0:02:59	0:02:51	0:00:08
LP - VL	0:01:07	0:01:05	0:00:02
VL - PF	0:01:53	0:01:37	0:00:16*
PF - SR	0:03:05	0:03:03	0:00:02

Estació amb parada
Estació sense parada

Real - Simulat Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real > 0
* Temps sota l'impacte de la LTV en el tram VL-PF descendent.

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 0
Infraestructura	Oth. Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodent	Soterrament Sabade II	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough

	Paràmetre	Iteració 0
Material Rodent	Performance	100,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentatge (correction)	100%
	Max. Acc	1,1
	Min. Time Hold Speed	0 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	-1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Al ser la iteració de referència no hi han modificacions respecte l'anterior.

Observacions

1. Corbes de frenada simulades millors que les reals.
2. Temps fora de la tolerància en ambdós sentits.
3. Tots els temps simulats més ràpids que els reals.
4. Tram VL-PF descendent amb influència de la LTV.
5. Trams VL-LP, LF-VD i VD-SC ascendent i VD-LF i VL-PF descendent corbes divergents.
6. Conducció simulada molt agressiva, no realista en el dia a dia.

Propostes de millora per pròxima iteració

- ∴ Reduir el rendiment (performance) de la UT113.
∴ Modificar la corba de frenada, reduir el potencial.
∴ Augmentar el temps "Min. Time hold speed".

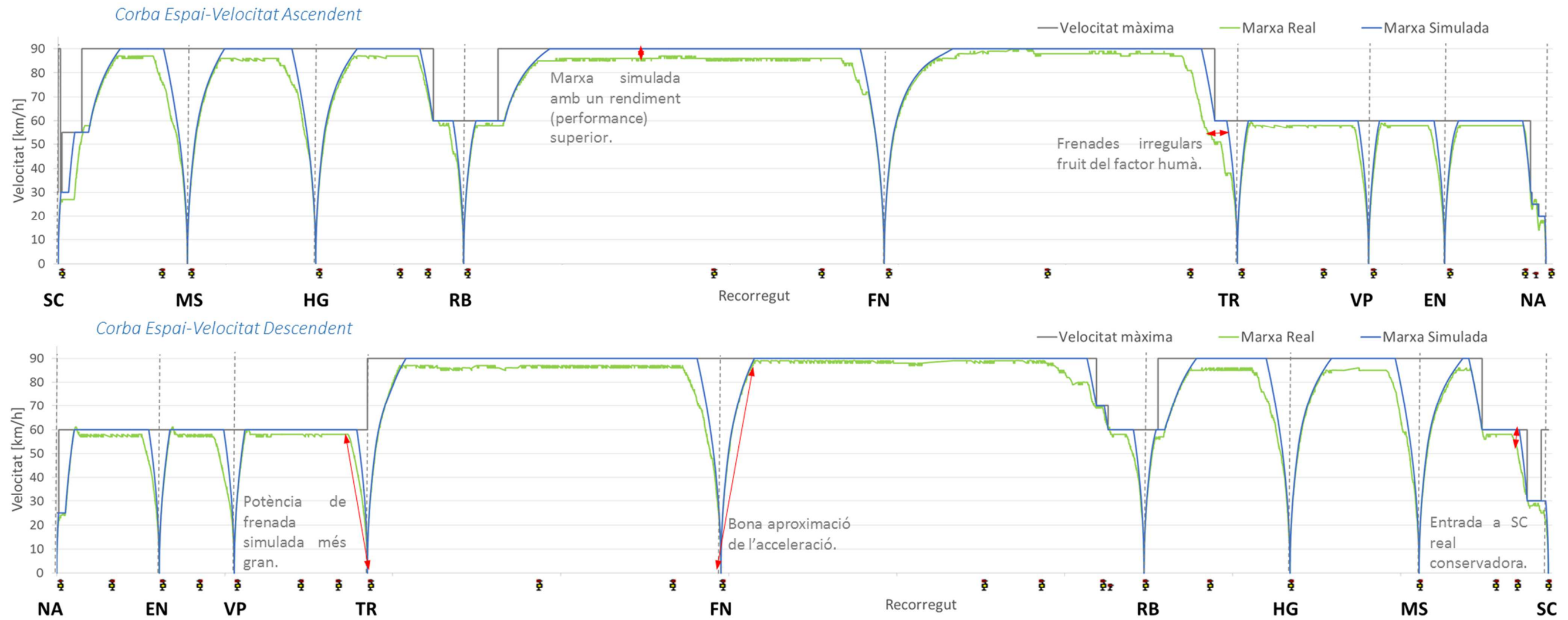
Conclusions

∴ No s'accepten cap dels temps simulats

- Material rodent es considera mal modelitzat.
- L'agressivitat de la conducció no és congruent amb la realitat.



Iteració 0. Tram SC-NA



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - MS	0:01:48	0:01:38	0:00:10
MS - HG	0:01:29	0:01:26	0:00:03
HG - RB	0:01:44	0:01:40	0:00:04
RB - FN	0:04:03	0:03:56	0:00:07
FN - TR	0:03:31	0:03:20	0:00:11
TR - VP	0:01:56	0:01:50	0:00:06
VP - EN	0:01:15	0:01:11	0:00:04
EN - NA	0:01:50	0:01:44	0:00:06

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
NA - EN	0:01:42	0:01:36	0:00:06
EN - VP	0:01:17	0:01:10	0:00:07
VP - TR	0:02:00	0:01:54	0:00:06
TR - FN	0:03:23	0:03:15	0:00:08
FN - RB	0:04:01	0:03:56	0:00:05
RB - HG	0:01:43	0:01:37	0:00:06
FG - MS	0:01:32	0:01:27	0:00:05
MS - SC	0:02:01	0:01:54	0:00:07

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

Paràmetre	Iteració 0
Oh.	Adhesion good (125%)
Adhesion Tunnel	good (125%)
Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
Túnel 1	Tunnel Double, Rough
Túnel 2	Tunnel Double, Rough
Túnel 3	Tunnel Double, Rough
Túnel 4	Tunnel Double, Rough
Túnel 5	Tunnel Double, Rough
Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough
Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough

Paràmetre	Iteració 0
Performance	100,0%
Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
Resist. Factor	3,3
Rot Mass Factor	1,08
Percentatge (correction)	100%
Max. Acc	1,1
Min. Time Hold Speed	0 s
Desacceleration Function	Default
Desacceleration Prop	-1,1 m/s ²
Correct Deceleration	NO



Modificacions

∴ Al ser la iteració de referència no hi han modificacions respecte l'anterior.

Observacions

1. Corbes de frenada simulades millors que les reals.
2. Temps fora de la tolerància en ambdós sentits.
3. Tots els temps simulats més ràpids que els reals.
4. Entrada i sortida a SC i entrada a TR i NA corbes divergents.
5. Velocitats reals no arriben a la màxima.

Propostes de millora per pròxima iteració

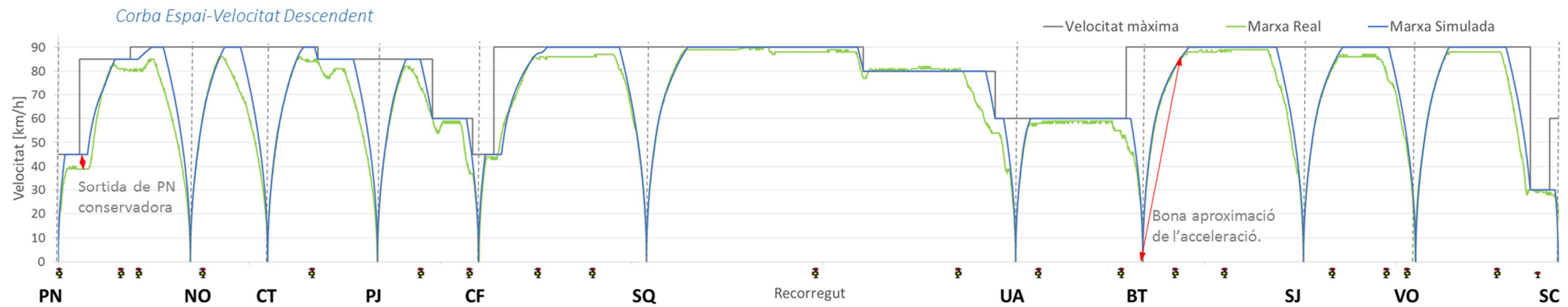
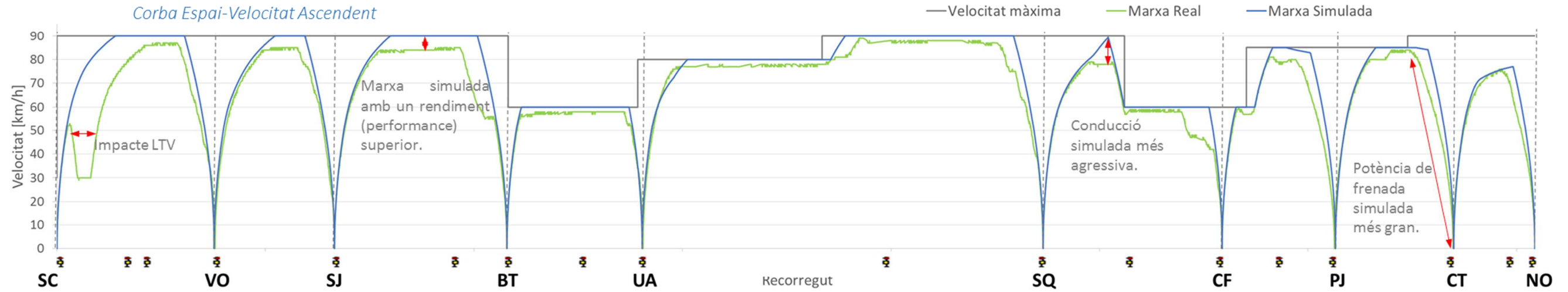
- ∴ Reduir el rendiment (performance) de la UT113.
 ∴ Modificar la corba de frenada, reduir el potencial.

Conclusions

∴ No s'accepten cap dels temps simulats

- Material rodant es considera mal modelitzat.
- L'agressivitat de la conducció no és congruent amb la realitat.

Iteració 0. Tram SC-PN



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VO	0:01:47	0:01:29	0:00:18*
VO - SJ	0:01:15	0:01:12	0:00:03
SJ - BT	0:01:39	0:01:32	0:00:07
BT - UA	0:01:39	0:01:35	0:00:04
UA - SQ	0:03:13	0:03:09	0:00:04
SQ - CF	0:02:00	0:01:53	0:00:07
CF - PJ	0:01:18	0:01:12	0:00:06
PJ - CT	0:01:17	0:01:11	0:00:06
CT - NO	0:01:03	0:00:58	0:00:05
NO - PN	0:03:25	0:01:36	0:01:49

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PN - NO	0:01:42	0:01:30	0:00:12
NO - CT	0:01:02	0:00:57	0:00:05
CT - PJ	0:01:16	0:01:11	0:00:05
PJ - CF	0:01:20	0:01:14	0:00:06
CF - SQ	0:01:44	0:01:43	0:00:01
SQ - UA	0:03:14	0:03:09	0:00:05
UA - BT	0:01:41	0:01:37	0:00:04
BT - SJ	0:01:34	0:01:33	0:00:01
SJ - VO	0:01:14	0:01:11	0:00:03
VO - SC	0:01:56	0:01:46	0:00:10

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

* Temps sota l'impacte de la LTV en el tram SC-VO ascendent.

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 0
Infraestructura	Oth.	
	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodant	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough
	Trains UT113	
Material Rodant	Performance	100,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max Acc	1,1
	Min. Time Hold Speed	0 s
Material Rodant	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	-1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO



Modificacions

∴ Al ser la iteració de referència no hi han modificacions respecte l'anterior.

Observacions

1. Corbes de frenada simulades millors que les reals.
2. Temps fora de la tolerància en ambdós sentits.
3. Tots els temps simulats més ràpids que els reals.
4. Velocitats reals no arriben a la màxima.
5. Influència LTV a la sortida de SC ascendent.
6. Conducció simulada molt agressiva, no realista en el dia a dia.
7. Sortida de PN conservadora.

Propostes de millora per pròxima iteració

- ∴ Reduir el rendiment (performance) de la UT113.
- ∴ Modificar la corba de frenada, reduir el potencial.

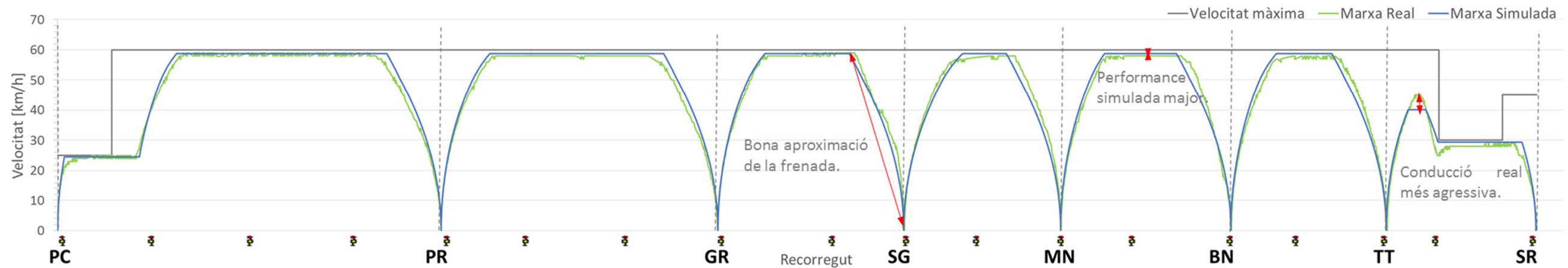
Conclusions

∴ No s'accepten cap dels temps simulats

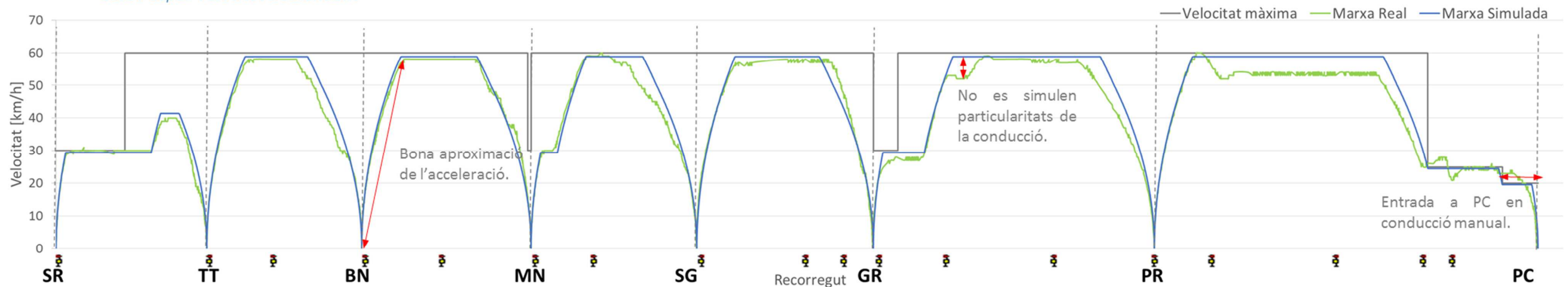
- Material rodant es considera mal modelitzat.
- L'agressivitat de la conducció no és congruent amb la realitat.

Iteració 5. Tram PC-SR

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:51	0:01:51	0:00:00
PR - GR	0:01:11	0:01:09	0:00:02
GR - SG	0:00:50	0:00:54	0:00:04
SG - MN	0:00:47	0:00:50	0:00:03
MN - BN	0:00:51	0:00:50	0:00:01
BN - TT	0:00:48	0:00:47	0:00:01
TT - SR	0:01:04	0:01:03	0:00:01

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - TT	0:01:03	0:01:02	0:00:01
TT - BN	0:00:47	0:00:47	0:00:00
BN - MN	0:00:49	0:00:51	0:00:02
MN - SG	0:00:56	0:00:52	0:00:04
SG - GR	0:00:48	0:00:51	0:00:03
GR - PR	0:01:21	0:01:20	0:00:01
PR - PC via 2	0:02:03	0:02:00	0:00:03

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 5
Infraestructura	Oth. Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament Sabadell	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 5
Material Rodent	Performance	98,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	5 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO



Modificacions

∴ Mínim temps de mantenir una velocitat establert en 5 segons

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració i la frenada.
2. Les velocitats màximes assolides són lleugerament superiors a les reals.
3. Corbes divergents en el tram GR-PC, producte de la particularitat en la mesura de referència.
4. Conducció real més agressiva en el tram TT-SR ascendent.
5. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

Propostes de millora

- ∴ Reduir el temps mínim de mantenir la velocitat per tal que la conducció simulada sigui més agressiva.
- ∴ Redir lleugerament la performance per ajustar les velocitats màximes simulades assolides.

Conclusions

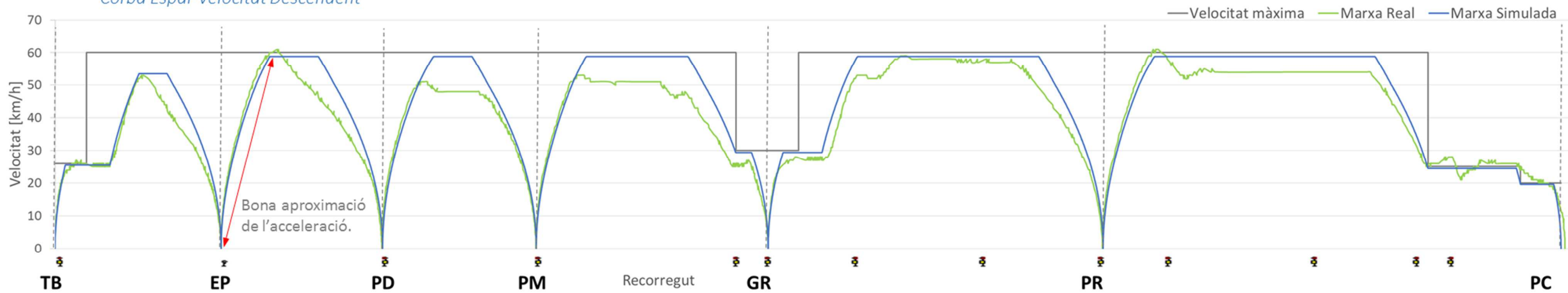
∴ Malgrat estar en tolerància, no s'accepten els resultats considerant que la corba espai-velocitat és millorable.

Iteració 5. Tram PC-TB

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:51	0:01:51	0:00:00
PR - GR via 3	0:01:32	0:01:25	0:00:07
GR - PM	0:01:13	0:01:08	0:00:05
PM - PD	0:00:45	0:00:46	0:00:01
PD - EP	0:00:49	0:00:50	0:00:01
EP - TB	0:01:04	0:01:01	0:00:03

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
TB - EP	0:00:58	0:00:55	0:00:03
EP - PD	0:00:46	0:00:45	0:00:01
PD - PM	0:00:45	0:00:43	0:00:02
PM - GR via 4	0:01:04	0:00:59	0:00:05
GR - PR	0:01:23	0:01:19	0:00:04
PR - PC via 1	0:02:04	0:02:03	0:00:01

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 5
Infraestructura	Oth. Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 5
Material Rodant	Performance	98,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	5 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s² 50-70 km/h --> -0,9 m/s² 70-90 km/h --> -1,1 m/s²
	Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Mínim temps de mantenir una velocitat establert en 5 segons.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració.
2. Les velocitats màximes assolides són lleugerament superiors a les reals.
3. Conducció real més agressiva.
4. Un valor fora de la tolerància ($\pm 5s$).
5. Tendència a temps de recorregut simulats més ràpids.

Propostes de millora

- ∴ Reduir el temps mínim de mantenir la velocitat per tal que la conducció simulada sigui més agressiva.
- ∴ Redir lleugerament la performance per ajustar les velocitats màximes simulades assolides.

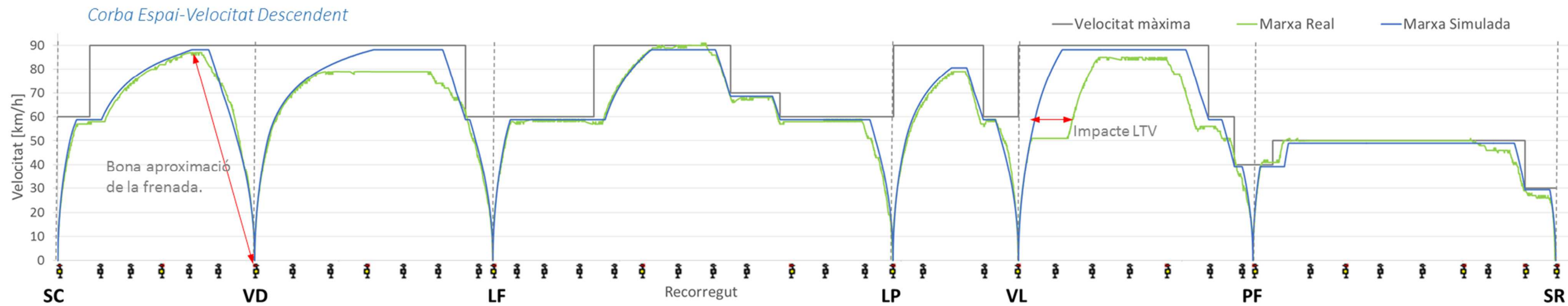
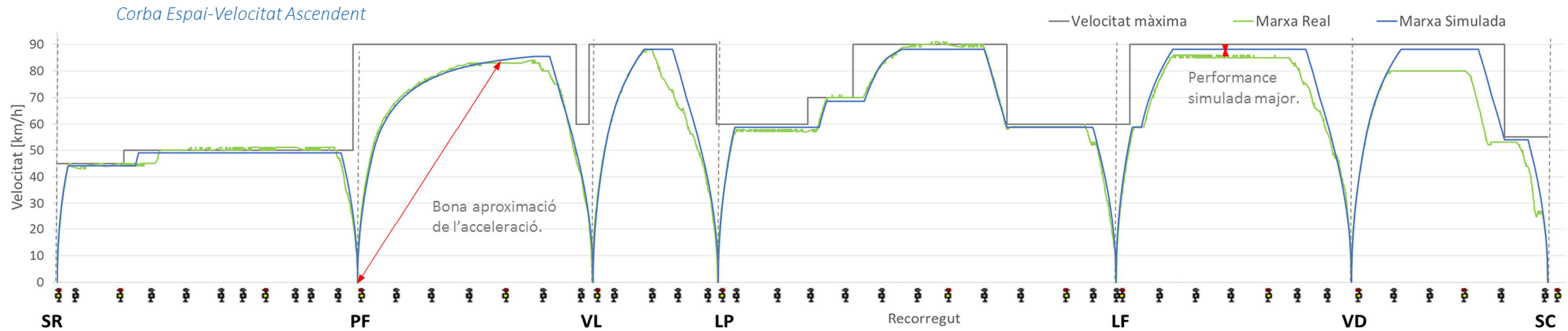
Conclusions

∴ Temps fora de tolerància, no s'accepten els resultats.

Estació amb parada
Estació sense parada
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real > 0



Iteració 5. Tram SR-SC



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF	0:02:56	0:02:59	0:00:03
PF - VL	0:01:42	0:01:45	0:00:03
VL - LP	0:01:08	0:01:04	0:00:04
LP - LF	0:02:58	0:02:53	0:00:05
LF - VD	0:01:38	0:01:38	0:00:00
VD - SC	0:01:36	0:01:29	0:00:07

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:31	0:00:03
VD - LF	0:01:45	0:01:41	0:00:04
LF - LP	0:02:59	0:02:57	0:00:02
LP - VL	0:01:07	0:01:07	0:00:00
VL - PF	0:01:53	0:01:41	0:00:16*
PF - SR	0:03:05	0:03:08	0:00:03

Estació amb parada
 Estació sense parada
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real > 0
 * Temps sota l'impacte de la LTV en el tram VL-PF descendent.

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 5
Infraestructura	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 5
Material Rodant	Performance	98,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	5 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO



Modificacions

∴ Mínim temps de mantenir una velocitat establert en 5 segons.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració i frenada.
2. Les velocitats màximes assolides són lleugerament superiors a les reals..
3. Un valor fora de la tolerància ($\pm 5s$) amb corbes divergents.
4. Tram VL-PF descendent amb influència de la LTV.

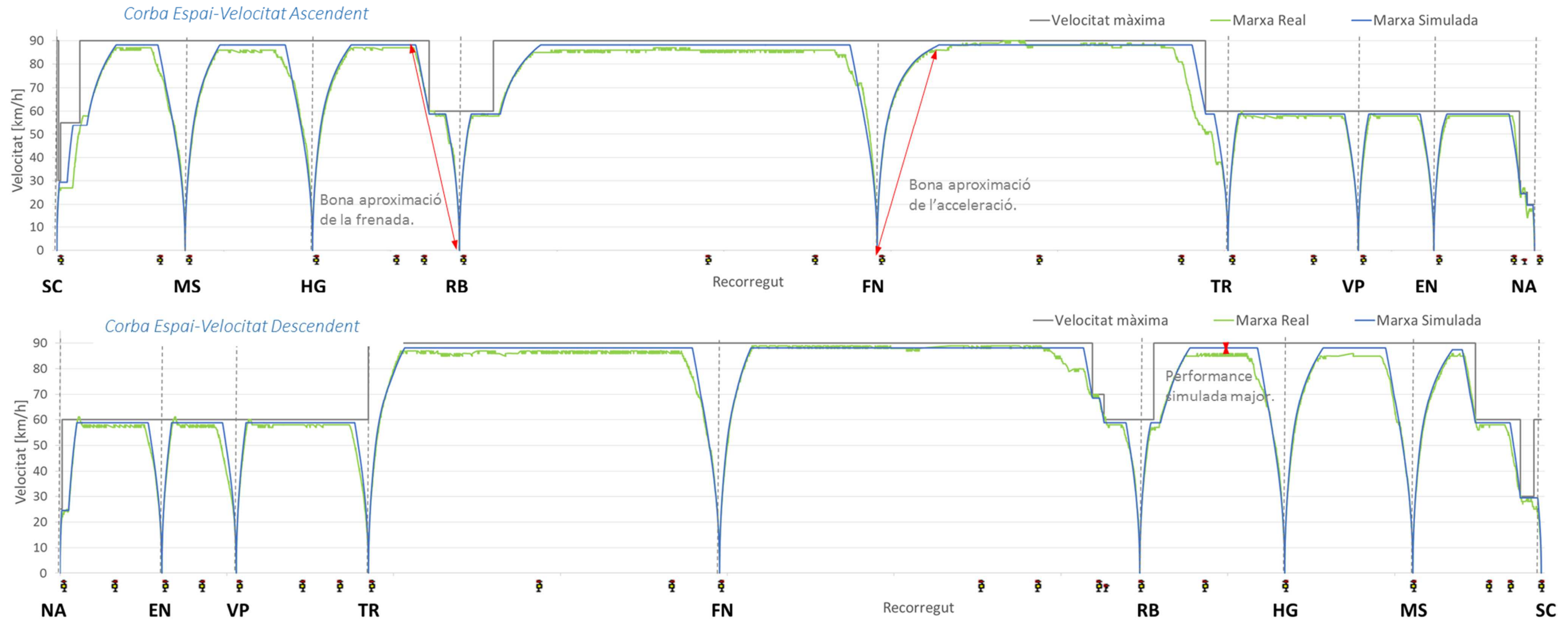
Propostes de millora

∴ Redir lleugerament la performance per ajustar les velocitats màximes simulades assolides.

Conclusions

∴ Temps fora de tolerància, no s'accepten els resultats.

Iteració 5. Tram SC-NA



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - MS	0:01:48	0:01:43	0:00:05
MS - HG	0:01:29	0:01:31	0:00:02
HG - RB	0:01:44	0:01:45	0:00:01
RB - FN	0:04:03	0:04:04	0:00:01
FN - TR	0:03:31	0:03:26	0:00:05
TR - VP	0:01:56	0:01:55	0:00:01
VP - EN	0:01:15	0:01:14	0:00:01
EN - NA	0:01:50	0:01:48	0:00:02

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
NA - EN	0:01:42	0:01:41	0:00:01
EN - VP	0:01:17	0:01:13	0:00:04
VP - TR	0:02:00	0:01:56	0:00:04
TR - FN	0:03:23	0:03:22	0:00:01
FN - RB	0:04:01	0:04:03	0:00:02
RB - HG	0:01:43	0:01:43	0:00:00
FG - MS	0:01:32	0:01:31	0:00:01
MS - SC	0:02:01	0:01:58	0:00:03

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 5
Infraestructura	Orh	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 5
Material Rodant	Performance	98,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	5 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Mínim temps de mantenir una velocitat establert en 5 segons.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració i frenada.
2. Les velocitats màximes assolides són lleugerament superiors a les reals.
3. Tots els temps dins de la tolerància.

Propostes de millora

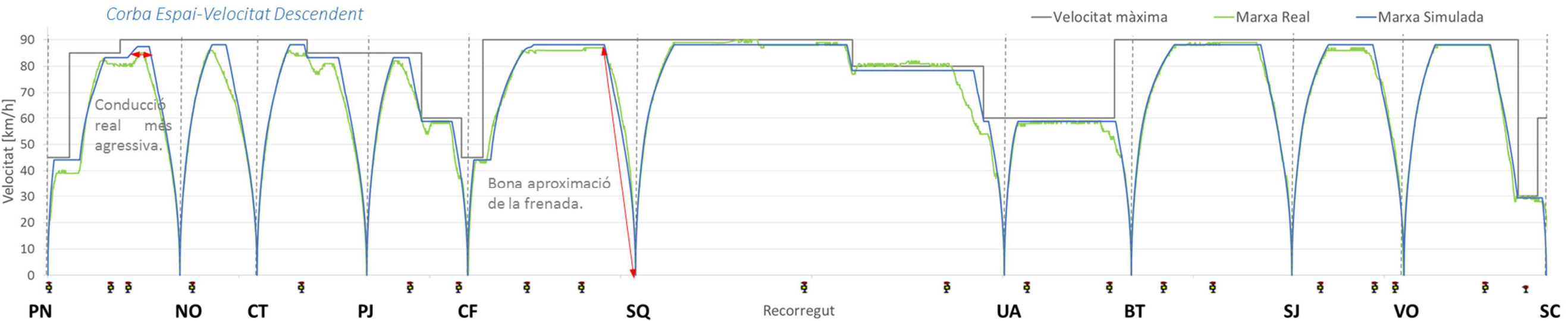
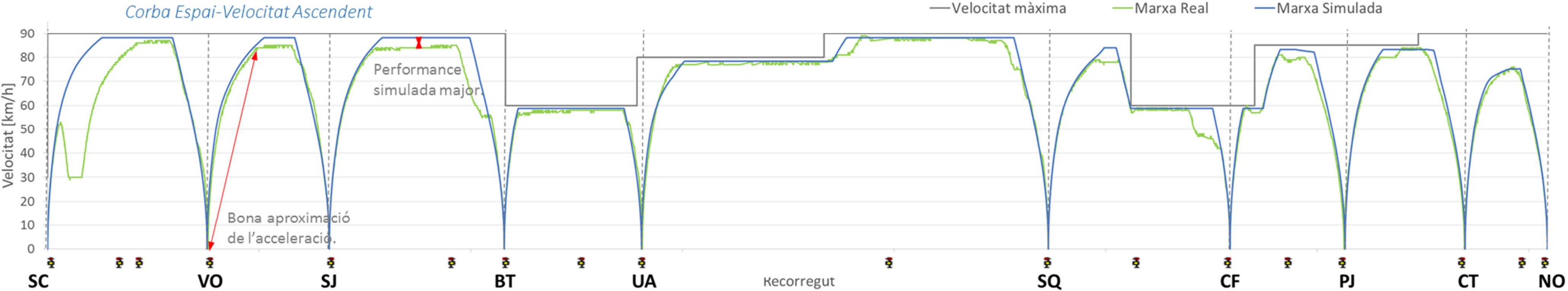
∴ Redir lleugerament la performance per ajustar les velocitats màximes simulades assolides.

Conclusions

∴ Malgrat estar en tolerància, no s'accepten els resultats considerant que la corba espai-velocitat és millorable.



Iteració 5. Tram SC-PN



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VO	0:01:47	0:01:30	0:00:18*
VO - SJ	0:01:15	0:01:16	0:00:01
SJ - BT	0:01:39	0:01:37	0:00:02
BT - UA	0:01:39	0:01:38	0:00:01
UA - SQ	0:03:13	0:03:16	0:00:03
SQ - CF	0:02:00	0:01:57	0:00:03
CF - PJ	0:01:18	0:01:16	0:00:02
PJ - CT	0:01:17	0:01:16	0:00:01
CT - NO	0:01:03	0:01:01	0:00:02

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PN - NO	0:01:42	0:01:36	0:00:06
NO - CT	0:01:02	0:01:00	0:00:02
CT - PJ	0:01:16	0:01:16	0:00:00
PJ - CF	0:01:20	0:01:17	0:00:03
CF - SQ	0:01:44	0:01:48	0:00:04
SQ - UA	0:03:14	0:03:15	0:00:01
UA - BT	0:01:41	0:01:41	0:00:00
BT - SJ	0:01:34	0:01:37	0:00:03
SJ - VO	0:01:14	0:01:16	0:00:02
VO - SC	0:01:56	0:01:50	0:00:06

Estació amb parada
Estació sense parada
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real > 0

* Temps sota l'impacte de la LTV en el tram SC-VO ascendent.

Paràmetres

Paràmetre		Iteració 5
Infraestructura	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

Paràmetre		Iteració 5
Material Rodant	Performance	98,0%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentatge (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	5 s
	Desacceleration Function	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO
Trains UT113		



Modificacions

∴ Mínim temps de mantenir una velocitat establert en 5 segons.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració.
2. Les velocitats màximes assolides són lleugerament superiors a les reals.
3. Conducció real més agressiva.
4. Alguns valors fora de la tolerància (±5s).
5. Tram SC-VO ascendent sota impacte de la LTV

Propostes de millora

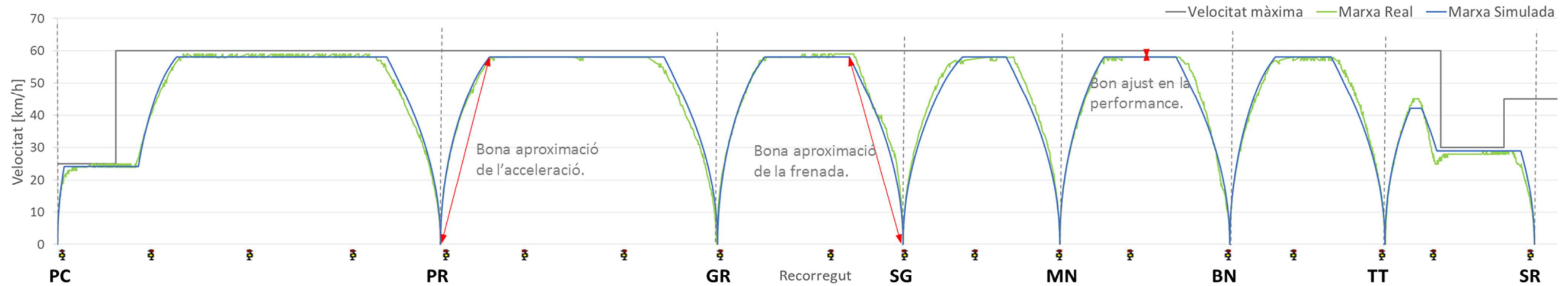
- ∴ Reduir el temps mínim de mantenir la velocitat per tal que la conducció simulada sigui més agressiva.
- ∴ Redir lleugerament la performance per ajustar les velocitats màximes simulades assolides.

Conclusions

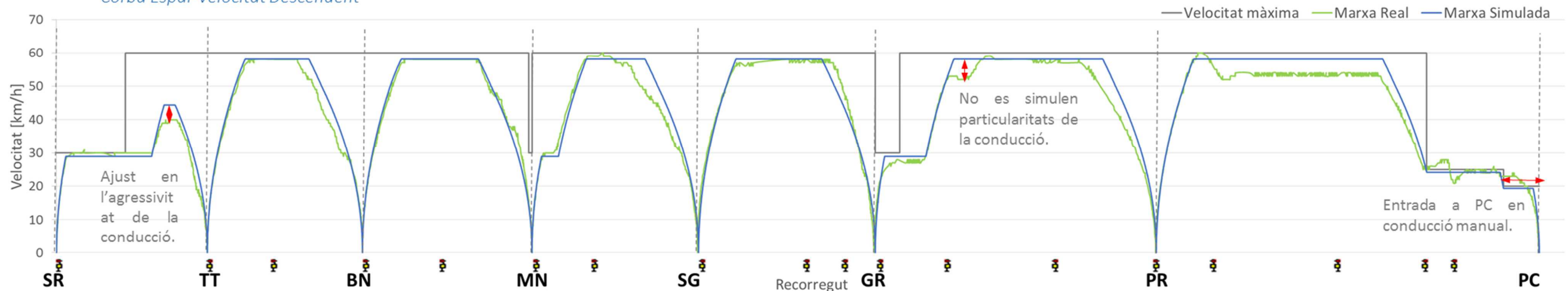
∴ Temps fora de tolerància, no s'accepten els resultats.

Iteració 10. Tram PC-SR

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:53	0:01:51	0:00:02
PR - GR	0:01:11	0:01:11	0:00:00
GR - SG	0:00:50	0:00:54	0:00:04
SG - MN	0:00:47	0:00:51	0:00:04
MN - BN	0:00:51	0:00:51	0:00:00
BN - TT	0:00:48	0:00:48	0:00:00
TT - SR	0:01:04	0:01:03	0:00:01

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - TT	0:01:03	0:01:02	0:00:01
TT - BN	0:00:47	0:00:48	0:00:01
BN - MN	0:00:49	0:00:51	0:00:02
MN - SG	0:00:56	0:00:53	0:00:03
SG - GR	0:00:48	0:00:51	0:00:03
GR - PR	0:01:21	0:01:20	0:00:01
PR - PC via 2	0:02:03	0:02:03	0:00:00

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

Paràmetre		Iteració 10
Infraestructura	Oth.	Adhesion good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodent	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth
	Performance	96,8%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
Material Rodent	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentatge (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	3 s
	Desacceleration Functio	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2
	Correct Deceleration	NO
	Trains UT113	
	Trains UT113	

Modificacions

∴ Performance al 96,8%.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració i la frenada.
2. Congruència en les velocitats màximes assolides.
3. Corbes divergents en el tram GR-PC, producte de la particularitat en la mesura de referència.
4. Bon ajust del paràmetre "Min. Time hold Speed", tram TT-SR ascendent i descendent.
5. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

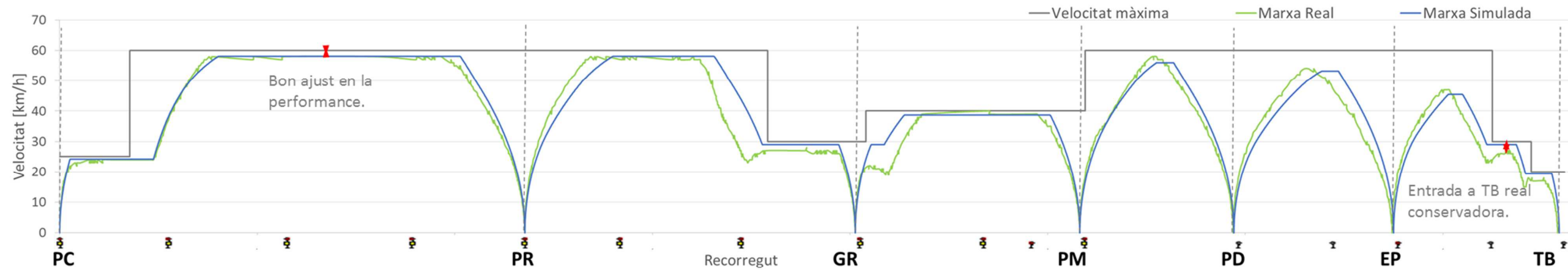
Conclusions

∴ S'accepten els resultats, fi iteració.

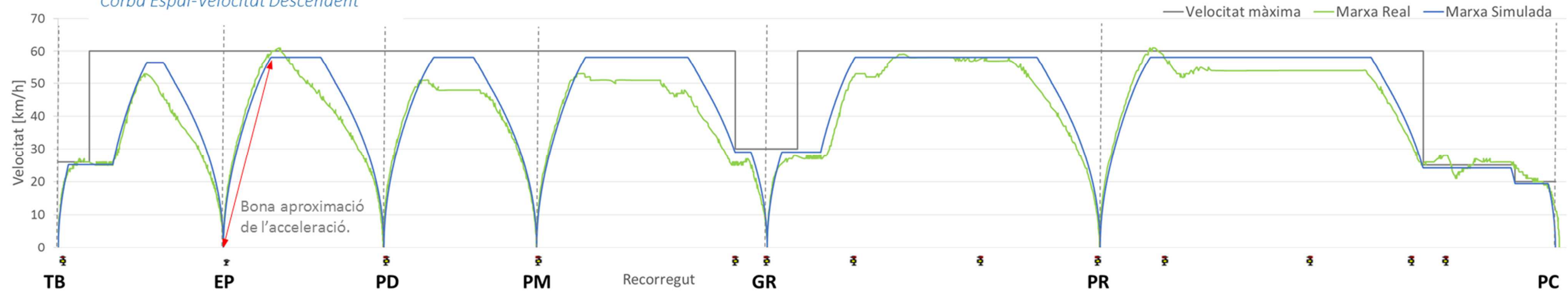


Iteració 10. Tram PC-TB

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:53	0:01:53	0:00:00
PR - GR via 3	0:01:32	0:01:27	0:00:05
GR - PM	0:01:13	0:01:09	0:00:04
PM - PD	0:00:45	0:00:46	0:00:01
PD - EP	0:00:49	0:00:49	0:00:00
EP - TB	0:01:04	0:01:02	0:00:02

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
TB - EP	0:00:58	0:00:55	0:00:03
EP - PD	0:00:46	0:00:45	0:00:01
PD - PM	0:00:45	0:00:44	0:00:01
PM - GR via 4	0:01:04	0:00:59	0:00:05
GR - PR	0:01:23	0:01:20	0:00:03
PR - PC via 1	0:02:04	0:02:05	0:00:01

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 10
Infraestructura	Oth.	
	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodant	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 10
Material Rodant	Performance	96,8%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	3 s
	Desacceleration Function	Default
		0-50 km/h --> -0,8 m/s ²
		50-70 km/h --> -0,9 m/s ²
Trains UT114	Desacceleration Prop	70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Performance al 96,8%.

Observacions

1. Congruència en les corbes d'acceleració.
2. Congruència en les velocitats màximes assolides.
3. Tram EP-PM descendent, corbes no congruents i temps tolerables, estudi particular.
4. Bon ajust del paràmetre "Min. Time hold Speed".
5. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

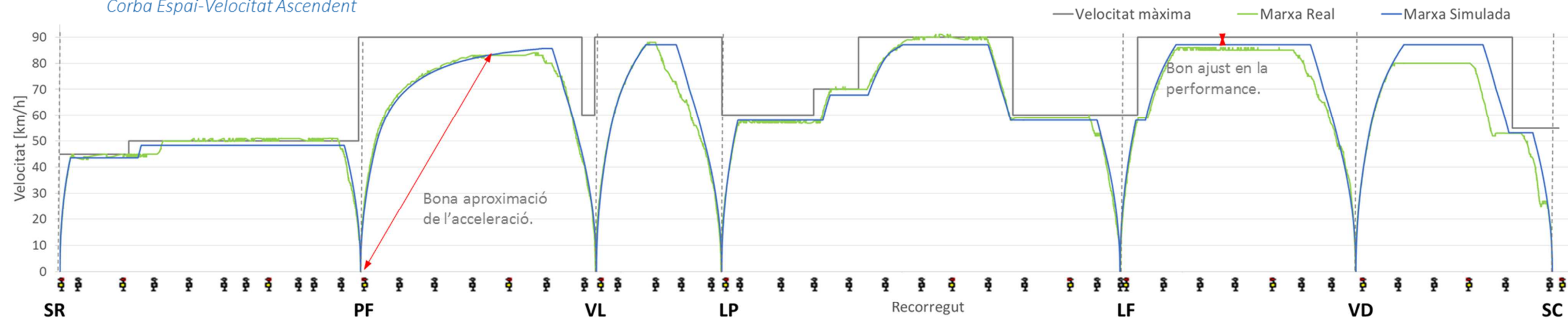
Conclusions

∴ S'accepten els resultats, fi iteració.

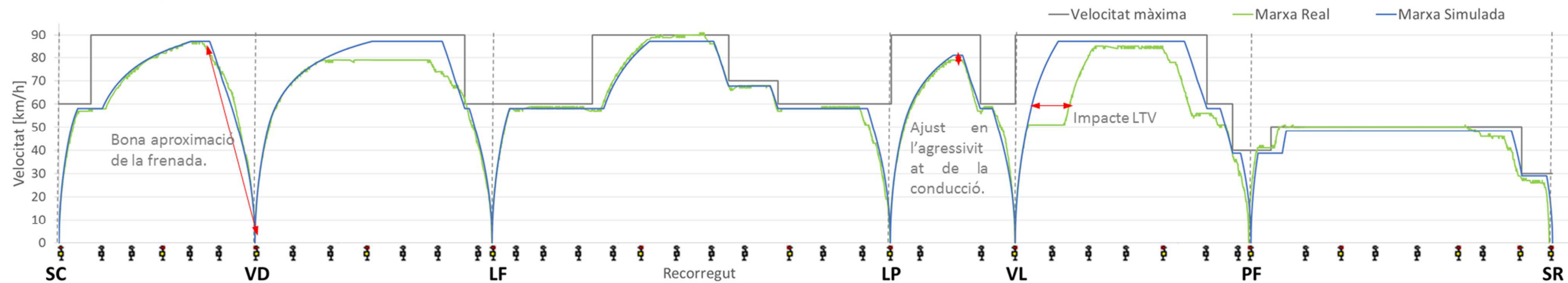


Iteració 10. Tram SR-SC

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF	0:02:56	0:03:01	0:00:05
PF - VL	0:01:42	0:01:47	0:00:05
VL - LP	0:01:08	0:01:04	0:00:04
LP - LF	0:02:58	0:02:56	0:00:02
LF - VD	0:01:38	0:01:38	0:00:00
VD - SC	0:01:36	0:01:31	0:00:05

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:31	0:00:03
VD - LF	0:01:45	0:01:43	0:00:02
LF - LP	0:02:59	0:02:59	0:00:00
LP - VL	0:01:07	0:01:08	0:00:01
VL - PF	0:01:53	0:01:42	0:00:11*
PF - SR	0:03:05	0:03:10	0:00:05

Estació amb parada
 Estació sense parada
Real - Simulat Temps simulat – Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat – Temps Real > 0
 * Temps sota l'impacte de la LTV en el tram VL-PF descendent.

Paràmetres

	Paràmetre	Iteració 10
Infraestructura	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Soterrament Sabadell		Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth

	Paràmetre	Iteració 10
Material Rodant	Performance	96,8%
	Equation Rolling	Strahl/Sathunoff
	Resist. Factor	3,3
	Rot Mass Factor	1,08
	Percentage (correction)	100%
	Max. Acc	1,15
	Min. Time Hold Speed	3 s
	Desacceleration Functio	Default
	Desacceleration Prop	0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
	Correct Deceleration	NO

Modificacions

∴ Performance al 96,8%.

Observacions

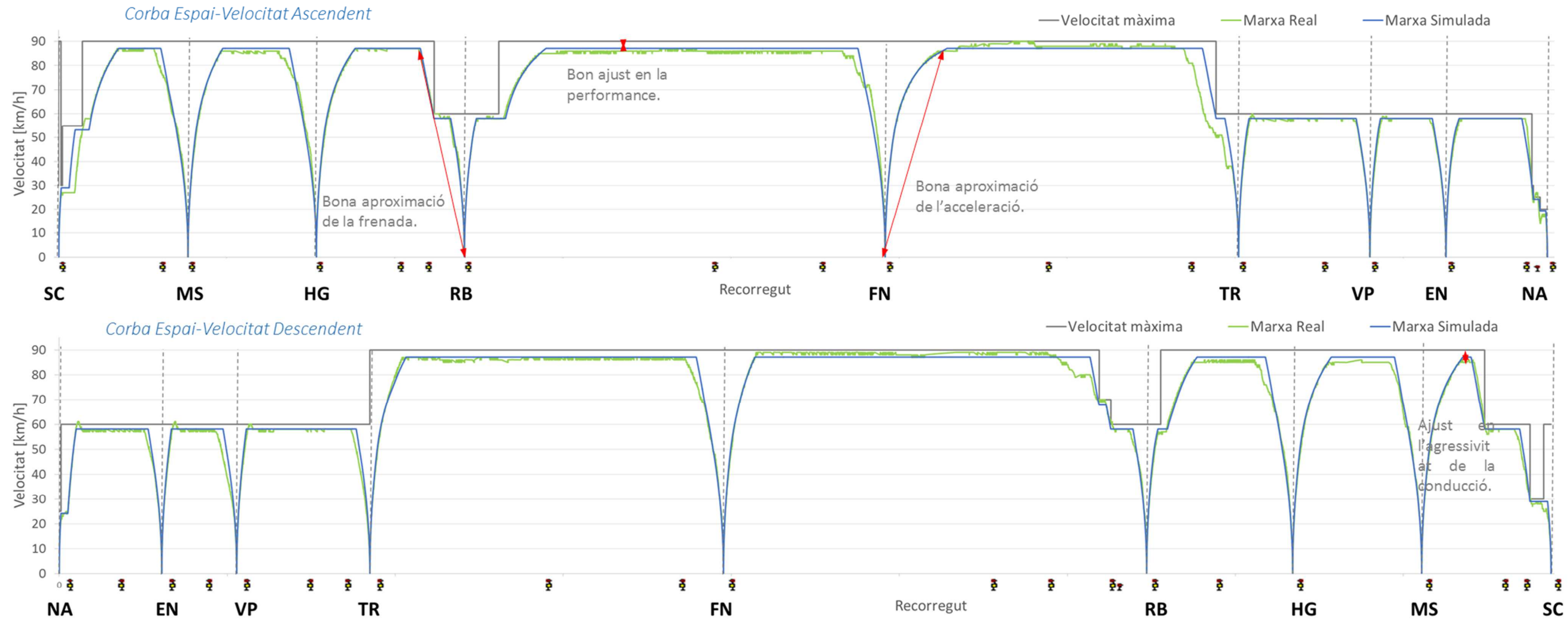
1. Congruència en les corbes l'acceleració i frenada.
2. Congruència en les velocitats màximes assolides en la majoria de trams.
3. Impacte major de reduir la performance en trams llargs amb velocitats baixes (SR-PF ascendent i descendent).
4. Tram VL-PF descendent sota impacte de la LTV.
5. Bon ajust del paràmetre "Min. Time hold Speed".
6. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

Conclusions

∴ S'accepten els resultats, fi iteració.



Iteració 10. Tram SC-NA



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - MS	0:01:48	0:01:44	0:00:04
MS - HG	0:01:29	0:01:32	0:00:03
HG - RB	0:01:44	0:01:45	0:00:01
RB - FN	0:04:03	0:04:07	0:00:04
FN - TR	0:03:31	0:03:29	0:00:02
TR - VP	0:01:56	0:01:56	0:00:00
VP - EN	0:01:15	0:01:15	0:00:00
EN - NA	0:01:50	0:01:50	0:00:00

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
NA - EN	0:01:42	0:01:42	0:00:00
EN - VP	0:01:17	0:01:14	0:00:03
VP - TR	0:02:00	0:01:57	0:00:03
TR - FN	0:03:23	0:03:24	0:00:01
FN - RB	0:04:01	0:04:06	0:00:05
RB - HG	0:01:43	0:01:44	0:00:01
FG - MS	0:01:32	0:01:32	0:00:00
MS - SC	0:02:01	0:01:59	0:00:02

Estació amb parada
 Estació sense parada
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat Temps simulat - Temps Real > 0

Paràmetres

Paràmetre		Iteració 10
Infraestructura	Oth.	Adhesion good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodent	Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth
	Trains UT113	
Paràmetre		Iteració 10
Performance		96,8%
Equation Rolling		Strahl/Sathunoff
Resist. Factor		3,3
Rot Mass Factor		1,08
Percentatge (correction)		100%
Max. Acc		1,15
Min. Time Hold Speed		3 s
Desacceleration Functio		Default
Desacceleration Prop		0-50 km/h --> -0,8 m/s ²
		50-70 km/h --> -0,9 m/s ²
		70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
Correct Deceleration		NO



Modificacions

∴ Performance al 96,8%.

Observacions

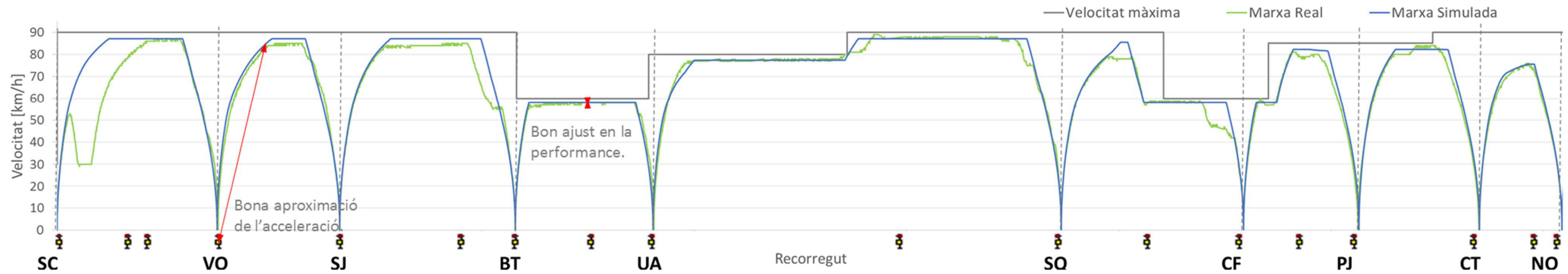
1. Congruència en les corbes l'acceleració i frenada.
2. Congruència en les velocitats màximes assolides en la majoria de trams.
3. Impacte major de reduir la performance en trams llargs amb velocitats baixes (SR-PF ascendent i descendent).
4. Bon ajust del paràmetre "Min. Time hold Speed".
5. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

Conclusions

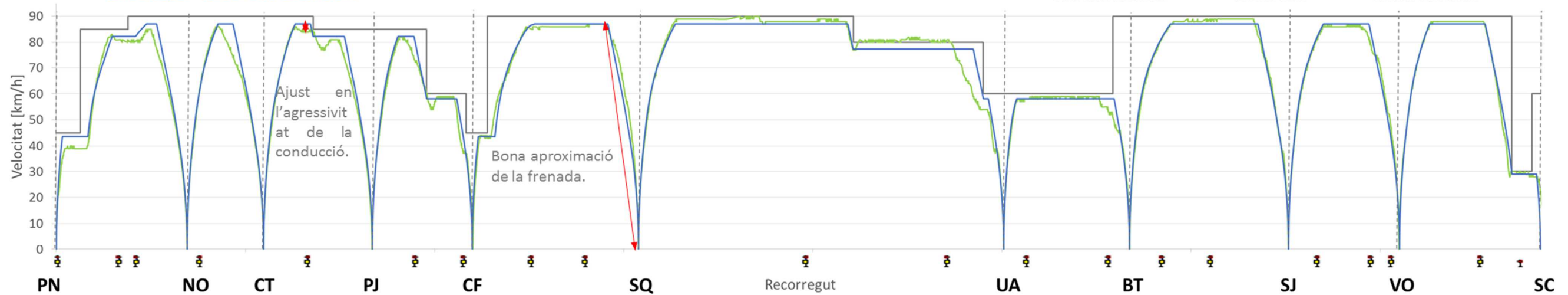
∴ S'accepten els resultats, fi iteració.

Iteració 10. Tram SC-PN

Corba Espai-Velocitat Ascendent



Corba Espai-Velocitat Descendent



Temps de recorregut

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VO	0:01:47	0:01:35	0:00:12*
VO - SJ	0:01:15	0:01:17	0:00:02
SJ - BT	0:01:39	0:01:38	0:00:01
BT - UA	0:01:39	0:01:40	0:00:01
UA - SQ	0:03:13	0:03:18	0:00:05
SQ - CF	0:02:00	0:01:58	0:00:02
CF - PJ	0:01:18	0:01:17	0:00:01
PJ - CT	0:01:17	0:01:16	0:00:01
CT - NO	0:01:03	0:01:02	0:00:01

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PN - NO	0:01:42	0:01:37	0:00:05
NO - CT	0:01:02	0:01:00	0:00:02
CT - PJ	0:01:16	0:01:16	0:00:00
PJ - CF	0:01:20	0:01:18	0:00:02
CF - SQ	0:01:44	0:01:49	0:00:05
SQ - UA	0:03:14	0:03:17	0:00:03
UA - BT	0:01:41	0:01:42	0:00:01
BT - SJ	0:01:34	0:01:38	0:00:04
SJ - VO	0:01:14	0:01:16	0:00:02
VO - SC	0:01:56	0:01:51	0:00:05

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat - Temps Real > 0

* Temps sota l'impacte de la LTV en el tram SC-VO ascendent.

Paràmetres

Paràmetre		Iteració 10
Infraestructura	Adhesion	good (125%)
	Adhesion Tunnel	good (125%)
	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2	Tunnel Double, Rough
	Túnel 3	Tunnel Double, Rough
	Túnel 4	Tunnel Double, Rough
	Túnel 5	Tunnel Double, Rough
	Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
	Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough
Material Rodant	Soterrament Sabade II	Tunnel single, Smooth
	Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough
	Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth
	Trains UT113	
Paràmetre		Iteració 10
Performance		96,8%
Equation Rolling		Strahl/Sathunoff
Resist. Factor		3,3
Rot Mass Factor		1,08
Percentatge (correction)		100%
Max. Acc		1,15
Min. Time Hold Speed		3 s
Desacceleration Function		Default
Desacceleration Prop		0-50 km/h --> -0,8 m/s ² 50-70 km/h --> -0,9 m/s ² 70-90 km/h --> -1,1 m/s ²
Correct Deceleration		NO

Modificacions

∴ Performance al 96,8%.

Observacions

1. Congruència en les corbes l'acceleració i frenada.
2. Congruència en les velocitats màximes assolides en la majoria de trams.
3. Impacte major de reduir la performance en trams llargs amb velocitats baixes (SR-PF ascendent i descendent).
4. Tram SC-VO ascendent sota impacte de la LTV.
5. Bon ajust del paràmetre "Min. Time hold Speed".
6. Tots els temps dins de la tolerància (±5s).

Conclusions

∴ S'accepten els resultats, fi iteració.



5.3 Discussió de resultats del procés iteratiu

Corbes d'acceleració i frenada.

Aconseguir unes corbes d'acceleració i frenada pròximes a les marxes reals ha concentrat els esforços de les primeres iteracions.

Es percep que la corba d'acceleració és congruent en la majoria d'observacions, això és deu en gran mesura a què la maniobra d'acceleració d'un tren com les UT113 i UT114 es realitza accionant el manipulador que es situa a potència màxima, reduint molt en factor humà i descrivint una corba espai-velocitat homogènia. En la figura 5.2 es mostra un exemple d'acceleracions congruents en situacions amb gradients diferents.

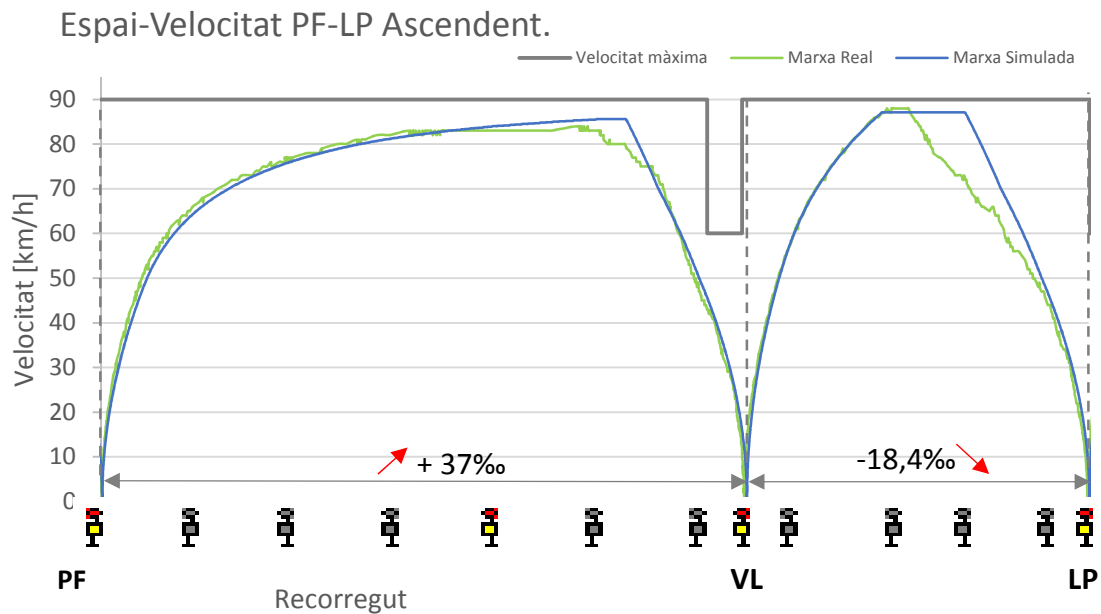


Figura 5.2 Gràfic espai-velocitat pel tram PF-LP ascendent. Font: elaboració pròpia.

La corba de frenada està més condicionada al factor humà, ja que el personal de conducció ha de controlar el manipulador durant tota la maniobra de desacceleració, tot i mostrar resultats congruents a la majoria d'observacions, alguns casos s'han trobat divergències de diferent naturalesa.

Per l'exemple presentat anteriorment, s'observa una bona aproximació de la frenada a l'entrada a Baixador de Vallvidrera, en canvi la corba a l'entrada de Les Planes presenta divergències sobretot en la part inicial d'aquesta, fruit d'una conducció més conservadora en la marxa real.

Per altra banda, s'observa la sensibilitat del model als gradients. En el tram Peu del Funicular – Baixador de Vallvidrera (gradient positiu per circulacions ascendents) la corba de velocitat necessita molt més recorregut que en el tram Baixador de Vallvidrera – Les Planes (gradient negatiu per circulacions ascendents) per assolir una mateixa velocitat.

Conducció.

És important realitzar una bona modelització dels paràmetres cinemàtics per tal d'obtenir unes corbes de frenada i acceleració properes a les reals, durant el procés iteratiu ha quedat palès que l'agressivitat en la conducció és un factor molt condicionant a l'hora d'obtenir uns resultats dins de la tolerància marcada.

És per això que els paràmetres "Performance", amb impacte directe sobre l'acceleració i la velocitat màxima assolida, i el temps mínim per mantenir una velocitat ("Min. Time hold speed") han jugat un paper clau a l'hora d'obtenir corbes espai-velocitat i temps de recorregut congruents.

Tal com s'ha comentat, el present estudi presenta certa variabilitat derivada del factor humà en el càlcul de les marxes reals. A continuació es presenta un exemple d'aquesta variabilitat entre la corba de frenada simulada i real. És important tenir present que l'exemple mostrat presenta un temps de recorregut simulat dins de la tolerància fixada en ± 5 s.

Tram Av. Tibidabo – Gràcia, descendent.

En aquest cas s'observa, el tram EP-PD i PD-PM. S'identifiquen divergències significatives en les corbes espai-velocitat en el moment de la frenada (figura 5.3), on es presenten diferències superiors a 10 km/h per un mateix punt de pas. No obstant, tal com ja s'ha comentat anteriorment, aquestes divergències no tenen un gran impacte en el temps de recorregut, (taula 5.1).

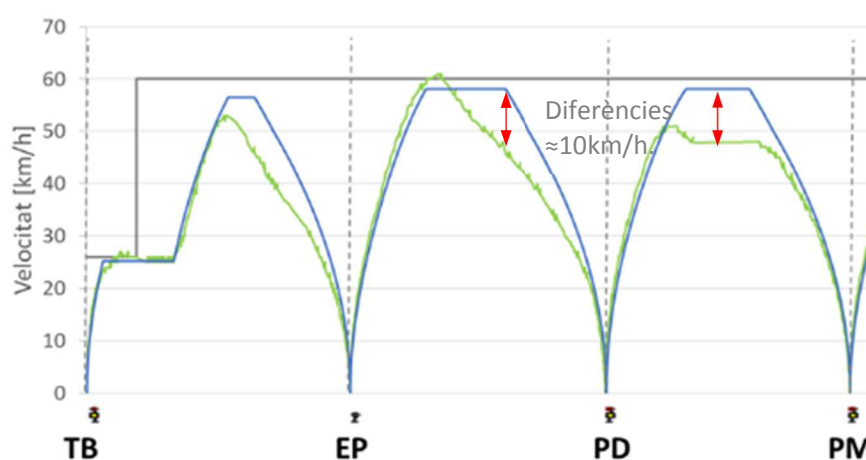


Figura 5.3 Gràfic espai-velocitat pel tram TB-PM descendent. Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
TB - EP	0:00:58	0:00:55	0:00:03
EP - PD	0:00:46	0:00:45	0:00:01
PD - PM	0:00:45	0:00:44	0:00:01
PM - GR via 4	0:01:04	0:00:59	0:00:05
GR - PR	0:01:23	0:01:20	0:00:03
PR - PC via 1	0:02:04	0:02:05	0:00:01

Real - Simulat
Real - Simulat

Estació amb parada
Estació sense parada
Temps simulat - Temps Real < 0
Temps simulat - Temps Real > 0

Taula 5.1 Temps de recorregut TB-PC descendent. Font: elaboració pròpia.

Seguidament es presenta la corba espai-temps (figura 5.4 i 5.5) d'ambdues marxes (reals i simulades), per poder comparar l'avenç d'ambdós solcs al llarg del temps.

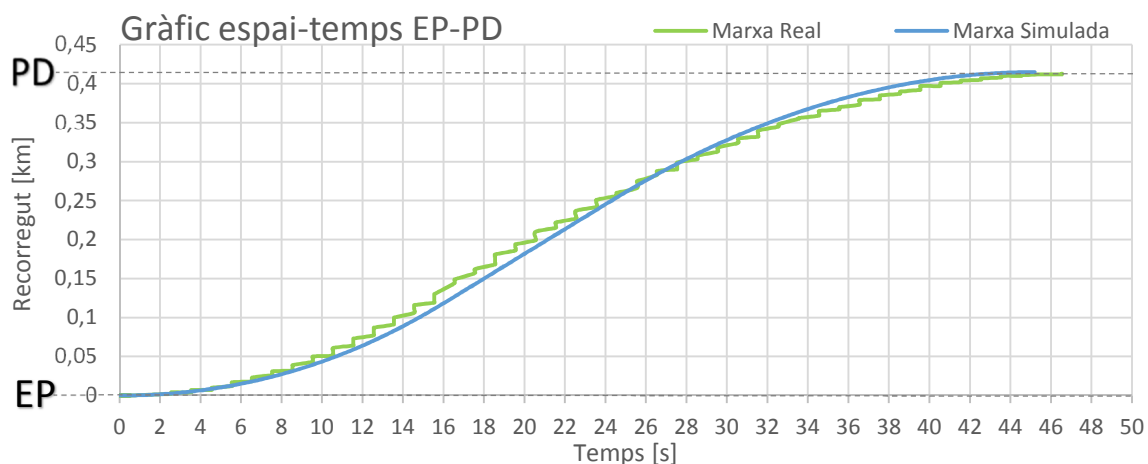


Figura 5.4 Gràfic temps-recorregut tram EP-PD descendent. Font: elaboració pròpia.

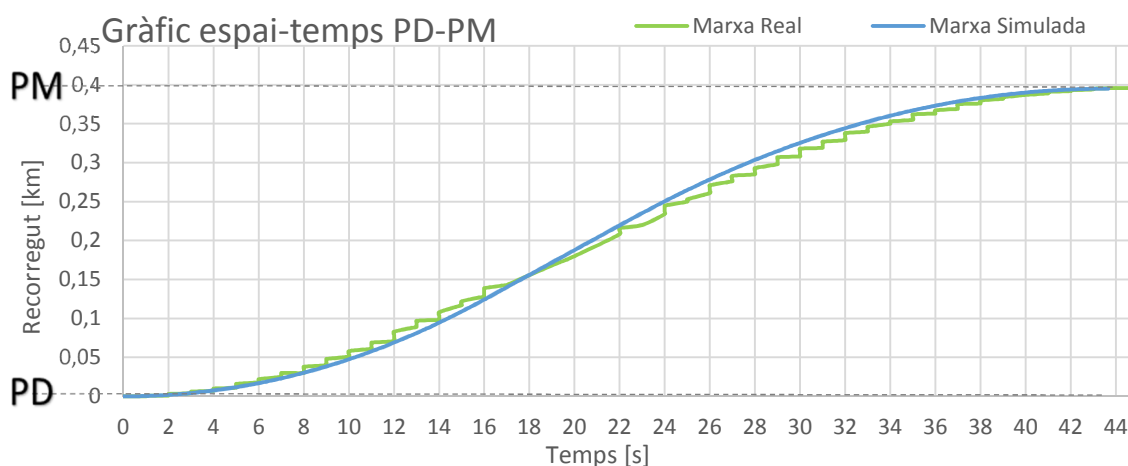


Figura 5.4 Gràfic temps-recorregut tram PD-PM descendent. Font: elaboració pròpia.

Tot i mostrar petites divergències entre les marxes simulades i reals, s'observa que, per un mateix punt del recorregut les diferències entre la marxa real i la simulada no arriben als 2 s. Per altra banda, per un mateix instant de temps, els solcs no disten més de 15 m.

Es conclou doncs que els resultats són acceptables a l'estar dins del criteri de tolerància marcat i no presentar diferències significatives (inferiors a 2s) en les corbes espai-temps.

Per tant, la lectura dels resultats tan sols amb la corba espai-velocitat pot no ser conclouent i és convenient complementar l'estudi amb altres gràfics de suport com pot ser l'esmentada corba temps-espai per a la comprovació i verificació dels resultats obtinguts.

5.4 Resultats de la simulació amb diferents polítiques d'aturades.

Obtingut el model calibrat dins dels criteris de tolerància establerts, es realitzen simulacions amb les diferents polítiques d'aturades descrites en els apartats precedents a fi de comprovar la robustesa del model i extreure conclusions i recomanacions per ajustar el calibratge en cas de diferents polítiques de servei.

Amb la voluntat de millorar la visualització i l'enteniment dels resultats, les simulacions han estat discernides per trams, tot seguint el procediment realitzat en el procés iteratiu.

A les taules 5.2 – 5.19 es mostren els temps de recorregut reals i simulats per les diferents polítiques d'aturades proposades (exceptuant els solcs que s'aturen a totes les estacions presentats anteriorment).

Cal recordar que hi han trams afectat per LTVs, els quals també en reben l'impacte en el temps de recorregut quan es simula sense algunes parades.

Tram Plaça Catalunya – Sarrià

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - TT			
TT - BN			
BN - MN	0:02:04	0:02:05	0:00:01
MN - SG			
SG - GR	0:01:26	0:01:28	0:00:02
GR - PR	0:01:21	0:01:20	0:00:01
PR - PC via 1	0:02:04	0:02:01	0:00:03
PR - PC via 2	0:02:03	0:02:03	0:00:00
PR - PC via 3	0:02:08	0:02:11	0:00:03
PR - PC via 4	0:02:10	0:02:09	0:00:01
PR - PC via 5	0:02:12	0:02:13	0:00:01

Taula 5.2 Temps de recorregut tram PC-SR ascendent, sense parada a SG, BN i TT. Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PC via 1 - PR	0:01:54	0:01:51	0:00:03
PC via 2 - PR	0:01:53	0:01:52	0:00:01
PC via 3 - PR	0:01:53	0:01:55	0:00:02
PC via 4 - PR	0:01:51	0:01:53	0:00:02
PC via 5 - PR	0:01:51	0:01:52	0:00:01
PR - GR	0:01:11	0:01:11	0:00:00
GR - SG			
SG - MN	0:01:23	0:01:24	0:00:01
MN - BN			
BN - TT			
TT - SR	0:02:05	0:02:05	0:00:00

Taula 5.3 Temps de recorregut tram PC-SR descendent, sense parada a SG, BN i TT. Font: elaboració pròpia.

	Estació amb parada
	Estació sense parada
Real - Simulat	Temps simulat – Temps Real < 0
Real - Simulat	Temps simulat – Temps Real > 0

* Temps sota l'impacte de la LTV

Tram Sarrià – Sant Cugat

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF			
PF - VL			
VL - LP			
LP - LF			
LF - VD			
VD - SC	0:10:03	0:10:13	0:00:10

Taula 5.4 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, directe entre SR i SC. Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD			
VD - LF			
LF - LP			
LP - VL			
VL - PF			
PF - SR	0:10:42	0:10:35	0:00:07*

Taula 5.5 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, directe entre SR i SC. Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF			
PF - VL			
VL - LP	0:05:03	0:05:13	0:00:10
LP - LF	0:02:58	0:02:55	0:00:03
LF - VD	0:01:38	0:01:39	0:00:01
VD - SC	0:01:36	0:01:32	0:00:04

Taula 5.6 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, sense parada a les estacions de PF i VL. Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:31	0:00:03
VD - LF	0:01:45	0:01:43	0:00:02
LF - LP	0:02:59	0:02:59	0:00:00
LP - VL			
VL - PF			
PF - SR	0:05:40	0:05:30	0:00:10*

Taula 5.7 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, sense parada a les estacions de PF i VL. Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF			
PF - VL			
VL - LP			
LP - LF			
LF - VD	0:08:57	0:09:09	0:00:12
VD - SC	0:01:36	0:01:32	0:00:04

Taula 5.8 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, directe entre SR i VD. Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:31	0:00:03
VD - LF			
LF - LP			
LP - VL			
VL - PF			
PF - SR	0:09:31	0:09:35	0:00:04*

Taula 5.9 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, directe entre SR i VD. Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SR - PF			
PF - VL			
VL - LP			
LP - LF	0:07:43	0:07:48	0:00:05
LF - VD	0:01:38	0:01:39	0:00:01
VD - SC	0:01:36	0:01:32	0:00:04

Taula 5.10 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent, sense parada a les estacions de PF, VL i LP. Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VD	0:01:28	0:01:31	0:00:03
VD - LF	0:01:45	0:01:43	0:00:02
LF - LP			
LP - VL			
VL - PF			
PF - SR	0:08:12	0:08:10	0:00:02*

Taula 5.11 Temps de recorregut tram SR-SC descendent, sense parada a les estacions de PF, VL i LP. Font: elaboració pròpia.

Tram Sant Cugat – Nacions Unides

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - MS			
MS - HG			
HG - RB	0:04:11	0:04:06	0:00:05
RB - FN			
FN - TR	0:07:08	0:07:06	0:00:02
TR - VP	0:01:56	0:01:56	0:00:00
VP - EN	0:01:15	0:01:15	0:00:00
EN - NA	0:01:50	0:01:50	0:00:00

Taula 5.12 Temps de recorregut tram SC-NAC ascendent, sense parada a les estacions de MS, HG i FN.

Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - MS			
MS - HG	0:02:53	0:02:48	0:00:05
HG - RB	0:01:44	0:01:45	0:00:01
RB - FN			
FN - TR	0:07:08	0:07:06	0:00:02
TR - VP	0:01:56	0:01:56	0:00:00
VP - EN	0:01:15	0:01:15	0:00:00
EN - NA	0:01:50	0:01:50	0:00:00

Taula 5.14 Temps de recorregut tram SC-NA ascendent, sense parada a les estacions de MS i FN.

Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
NA - EN	0:01:42	0:01:42	0:00:00
EN - VP	0:01:17	0:01:14	0:00:03
VP - TR	0:02:00	0:01:57	0:00:03
TR - FN			
FN - RB	0:06:59	0:07:03	0:00:04
RB - HG			
FG - MS			
MS - SC	0:04:19	0:04:19	0:00:00

Taula 5.13 Temps de recorregut tram SC-NC descendent, sense parada a les estacions de MS, HG i FN.

Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
NA - EN	0:01:42	0:01:42	0:00:00
EN - VP	0:01:17	0:01:14	0:00:03
VP - TR	0:02:00	0:01:57	0:00:03
TR - FN			
FN - RB	0:06:59	0:07:03	0:00:04
RB - HG	0:01:43	0:01:44	0:00:01
FG - MS			
MS - SC	0:03:04	0:03:04	0:00:00

Taula 5.15 Temps de recorregut tram SC-NA descendent, sense parada a les estacions de MS i FN.

Font: elaboració pròpia.

Tram Sant Cugat – Parc del Nord

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VO	0:01:47	0:01:35	0:00:12*
VO - SJ	0:01:15	0:01:17	0:00:02
SJ - BT			
BT - UA	0:03:00	0:02:56	0:00:04
UA - SQ			
SQ - CF			
CF - PJ	0:05:43	0:05:46	0:00:03
PJ - CT	0:01:17	0:01:16	0:00:01
CT - NO	0:01:03	0:01:02	0:00:01

Taula 5.16 Temps de recorregut tram SC-NO ascendent, sense parada a les estacions de BT, SQ i CF.

Font: elaboració pròpia.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
SC - VO	0:01:47	0:01:35	0:00:12*
VO - SJ	0:01:15	0:01:17	0:00:02
SJ - BT			
BT - UA	0:03:00	0:02:56	0:00:04
UA - SQ			
SQ - CF	0:04:58	0:04:46	0:00:12
CF - PJ	0:01:18	0:01:17	0:00:01
PJ - CT	0:01:17	0:01:16	0:00:01
CT - NO	0:01:03	0:01:02	0:00:01

Taula 5.18 Temps de recorregut tram SC-NO ascendent, sense parada a les estacions de BT i SQ.

Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PN - NO	0:01:42	0:01:37	0:00:05
NO - CT	0:00:56	0:01:01	0:00:05
CT - PJ	0:01:16	0:01:16	0:00:00
PJ - CF			
CF - SQ			
SQ - UA	0:05:47	0:05:43	0:00:04
UA - BT			
BT - SJ	0:02:55	0:02:57	0:00:02
SJ - VO	0:01:14	0:01:16	0:00:02
VO - SC	0:01:56	0:01:51	0:00:05

Taula 5.17 Temps de recorregut tram SC-PN descendent, sense parada a les estacions de BT, SQ i CF.

Font: elaboració pròpia.

Descendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
PN - NO	0:01:42	0:01:37	0:00:05
NO - CT	0:00:56	0:01:01	0:00:05
CT - PJ	0:01:16	0:01:16	0:00:00
PJ - CF	0:01:20	0:01:18	0:00:02
CF - SQ			
SQ - UA	0:04:36	0:04:39	0:00:03
UA - BT			
BT - SJ	0:02:55	0:02:57	0:00:02
SJ - VO	0:01:14	0:01:16	0:00:02
VO - SC	0:01:56	0:01:51	0:00:05

Taula 5.19 Temps de recorregut tram SC-PN descendent, sense parada a les estacions de BT i SQ.

Font: elaboració pròpia.

Temps fora de tolerància

De l'anàlisi dels resultats se n'extreu que la majoria de temps de recorregut simulats entren dins de la tolerància fixada en ± 5 s. No obstant alguns trams no superen aquest criteri marcat. A continuació es discuteixen els resultats que han quedat fora de tolerància.

En el tram Sarrià – Sant Cugat en sentit ascendent s'observa que les marxés simulades en els recorreguts semidirectes presenten un temps de recorregut superior (≈ 10 s) a la mesura extreta de les marxés reals. Cal dir que en aquest tram les velocitats de circulació són elevades ($V_{\max} = 90$ km/h) i sostingudes durant una llargada considerable, en aquestes situacions l'impacte de la "Performance" del 96,8% penalitza excessivament els temps de recorregut simulat.

No obstant, la diferència relativa respecte a les mesures reals és de pocs punts percentuals (taula 5.20), concretament:

Tram	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat	% TDR Real
SR - SC	0:10:03	0:10:13	0:00:10	1,66%
SR - LP	0:05:03	0:05:13	0:00:10	3,30%
SR-VD	0:08:57	0:09:09	0:00:12	2,23%

Taula 5.20 Temps de recorregut tram SR-SC ascendent fora de la tolerància.
Font: elaboració pròpia.

Com es pot observar la diferència relativa entre el temps de recorregut real mesurat i la diferència entre els temps simulats i reals és sempre inferior al 5%. Els temps obtinguts estan sempre del cantó de la seguretat, ja que el temps simulats presenten valors superiors, per això es dona com a acceptable el resultat del calibratge.

Casos on les mesures reals són massa lentes i per tant no òptimes pel calibratge.

Tal com es mostra a la taula 5.21 el temps de recorregut simulat del tram Sant Quirze – Can Feu en sentit ascendent no entra tolerància, concretament el temps simulat és 12 segons més ràpid que el real, tot i així aquesta diferència suposa tan sols el 4% sobre el temps de recorregut real.

Per altra banda, la diferència entre els temps de recorregut real i simulat entre Universitat Autònoma i Can Feu quan ens aturem a Sant Quirze és de 3 segons (simulat més lent). El que demostra certa incongruència entre ambdós resultats.

Ascendent	TDR Real	TDR Simulat	Real-Simulat
UA - SQ	0:03:13	0:03:18	0:00:05
SQ - CF	0:02:00	0:01:58	0:00:02
UA - CF	0:04:58	0:04:46	0:00:12

Taula 5.21 Temps de recorregut tram pel tram UA-CF/PJ amb diferent política d'aturades. Font: elaboració pròpia.

Tenint en compte els punts anteriors, es comprova la corba espai-velocitat (figura 5.6) del cas sense aturada a Sant Quirze, corresponent al dia 8 moviment 5 detallat al Annex 1, taula A1.3.

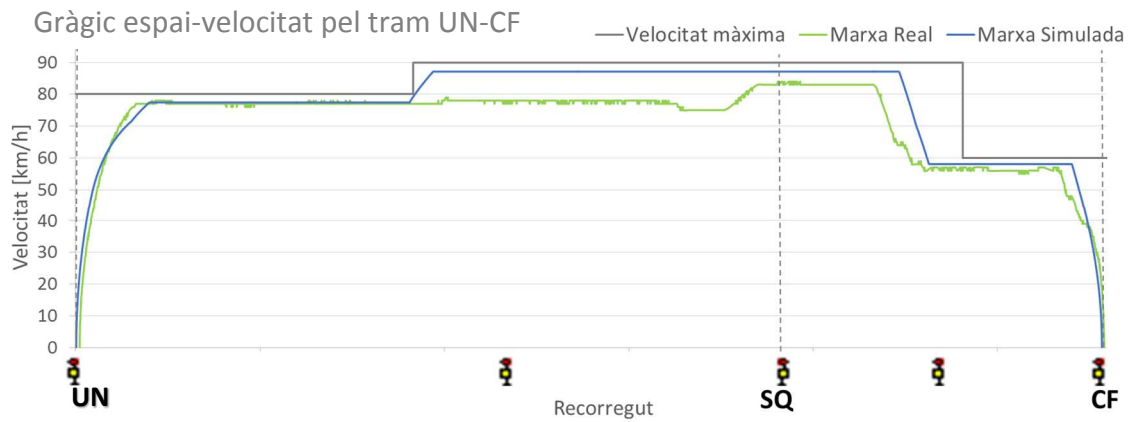


Figura 5.6 Gràfic espai-velocitat en el tram Universitat Autònoma – Can Feu | Gràcia, en el cas de no aturar-se a Sant Quirze.. Font: elaboració pròpia.

S'observa que en el tram central del recorregut la velocitat màxima assolible és 90 km/h i la mesura real obtinguda circula al voltant de 80 km/h. En canvi, la velocitat simulada s'acosta més als 90 km/h esmentats. Al ser un recorregut llarg amb una velocitat alta sostinguda, aquesta diferència entre les celeritats màximes penalitza molt en el temps de recorregut.

Analitzada aquesta corba es conclou que la marxa real realitzada per aquest moviment no mostra una agressivitat prou elevada en la conducció, per tant, el marc de referència agafat no és l'òptim. Com que no es disposa de cap altre mesura per aquest moviment, s'accepta el valor simulat, ja que malgrat els resultats no respectin la tolerància fixada són coherents.

Un altre exemple de mesures reals no òptimes com a referència pel calibratge el trobem quan les condicions de contorn imposades durant la campanya de mesures per la infraestructura (característiques geomètriques i/o senyalització) no es corresponen amb les condicions quotidianes. La presència de dues LTV han tingut impacte sobre els temps de recorregut també en el cas amb diferents polítiques d'aturades.

Com s'ha comentat la LTV del túnel 4 en sentit descendent era mòbil, per tant l'impacte sobre els temps de recorregut mesurats és diferent en funció de la localització de la LTV. Aquest fenomen es deu a que l'afectació que pot generar la presència de la limitació en una zona on ja s'està accelerant o frenant és inferior a l'impacte generat si coincideix en un tram on es circula a velocitat màxima (cas d'estudi de la pàgina 39).

6. Conclusions i recomanacions

6.1 De caràcter general.

El present estudi pretenia calibrar un model virtual de la línia Barcelona-Vallès amb un software de simulacions dinàmiques ferroviàries (OpenTrack) amb un criteri de tolerància definit en $\pm 5s$. Les mesures reals utilitzades pel procés de calibratge han estat obtingudes en condicions particulars a propòsit d'obtenir un temps de recorregut proper al mínim tècnic entre punts concrets de la línia.

No obstant, cal recordar que, les mesures reals tenen certa variabilitat a raó del factor humà en la conducció, aquest aspecte s'ha intentat pal·liar realitzant totes les circulacions amb el mateix maquinista i les mateixes condicions de contorn (sense interacció amb altres trens i circulant sempre a màxima velocitat permesa per la geometria de la infraestructura i els sistemes de senyalització i protecció). Les mesures s'han realitzat durant la mateixa època de l'any per homogeneïtzar l'efecte del factor climàtic.

OpenTrack simula les circulacions ferroviàries tenint en compte multitud de paràmetres modificables per part de l'usuari. En l'apartat 4.4 del present estudi es detallen tots els paràmetres existents, tanmateix, durant el procés de calibratge de l'eina s'han optimitzat els valors corresponents als següents paràmetres: "Performance", "Min. Time Hold Speed", acceleració màxima, desacceleració màxima en funció del rang de velocitats i el factor túnel. Per la resta de paràmetres s'ha optat pel valor proposat per OpenTrack per defecte.

Durant el calibratge no s'ha modelitzat la totalitat del servei. Tan sols de determinats solcs de referència, és a dir solcs amb una política d'aturades concreta i sense interacció amb altres trens.

El present estudi ha aconseguit proposar uns paràmetres homogenis vàlids per tota la xarxa, tot el material rodant i tot el personal de conducció, pels quals els temps de recorregut simulat entren dins de la tolerància fixada.

En línies generals, les corbes espai-velocitat de les marxés simulades presenten un comportament lògic i paral·lel a les corbes reals.

Es considera bona la modelització realitzada de la frenada i l'acceleració, especialment per la UT113 i UT114. No obstant, la modelització del comportament de la frenada de la UT114 es podria millorar en cas de renunciar a la hipòtesi inicial de proposar uns paràmetres homogenis per tot el material rodant.

Una bona modelització del comportament de conducció és el factor més condicionant per aconseguir una bona modelització. Els dos paràmetres calibrats són:

- ∴ Paràmetre "Performance" (rendiment en la conducció). Aquest paràmetre afecta el rendiment tant en l'acceleració com en la circulació en línia (no així en la frenada). Establint un valor del 96,8%, s'aconsegueix que les velocitats simulades assoleixin valors propers a mesures reals, ja que les mesures reals tendeixen a ser lleugerament inferiors a la velocitat màxima permesa per la infraestructura. No obstant, en trams llargs en línia amb velocitats homogènies el paràmetre "Performance" té un gran impacte sobre els temps de recorregut simulat que tendeixen a ser massa elevats.

- ∴ Paràmetre “Min. Time hold speed” (temps mínim de manteniment de velocitat). Aquest paràmetre defineix l’interval de temps mínim pel qual es garanteix que es podrà mantenir una velocitat determinada, en cas que aquest interval mínim no es respecti, el maquinista optarà per no accelerar i frenar. Durant el calibratge s’ha identificat un valor mínim de 3 segons entre acceleracions i desacceleracions consecutives. Evidentment, aquest valor de 3 segons no és compatible amb una conducció eficient, però respon al perfil de conducció agressiva que es vol modelitzar.

La simulació de diferents polítiques d’aturades i el contrast dels resultats simulats amb els resultats reals mesurats han verificat la robustesa del model front a canvis amb polítiques de servei. És per aquest motiu que per a futurs usos o calibratges del calculador es recomana seguir la mateixa metodologia pel que fa a la comprovació dels temps de recorregut quan els trens no s’aturen a totes les estacions.

6.2 Específiques.

Infraestructura

El calibratge de la infraestructura ha revelat una enorme sensibilitat del model front a pendents pronunciats prolongats (gran impacte en les corbes espai-velocitat i en els temps de recorregut). Per aquest motiu, per a futures utilitzacions de l’eina es recomana parlar especial atenció en la codificació i modelització d’aquest aspecte de la geometria.

El calibratge de la infraestructura en el model actual d’OpenTrack es limita als túnels existents. Analitzant la infraestructura vigent s’ha optat per modelitzar els túnels corresponents al perllongament de Terrassa i Sabadell com a túnels simples d’acabat llis i la resta de túnels han estat modelitzats com a túnels dobles d’acabat rugós.

Material rodant

Els paràmetres indicats pel fabricant han estat una bona base de partida per a la modelització del material rodant.

Els gràfics espai-velocitat han mostrat una corba d’acceleració simulada i real amb escasses diferències per pràcticament la totalitat d’observacions.

Per la modelització de l’acceleració màxima s’ha mantingut un paràmetre ($1,15 \text{ m/s}^2$) proper a l’indicat pel fabricant i únic per la UT113 i UT114.

Tal i com s’ha comentat anteriorment, la modificació del paràmetre “Performance” influeix directament sobre la corba d’acceleració simulada. Per tant per a propers usos del calculador de marxos tècniques es recomana revisar el comportament de les corbes d’acceleració simulades en funció dels valors proposats pel binomi “Performance”-Acceleració màxima.

S'han modificat de forma substancial els paràmetres referents a la frenada. Aquesta maniobra és la més susceptible a presentar-se poc homogènia degut a la gran incidència que en ella té el factor humà. Els valors per la modelització de la frenada han estat per la UT113 i la UT114:

- ∴ Entre 0-50 km/h, $-0,8 \text{ m/s}^2$
- ∴ Entre 50-70 km/h, $-0,9 \text{ m/s}^2$
- ∴ Entre 70-90 km/h, $-1,1 \text{ m/s}^2$

Per uns resultats més precisos es recomana discernir la frenada en diferents trams, ja que amb la designació d'un valor constant ($-1,1 \text{ m/s}^2$) la frenada simulada presenta perfils molt més pronunciats (es frena més i més tard) i temps de recorregut menors respecte els reals.

Per la UT113 s'ha aconseguit una corba de frenada paral·lela a la corba de frenada real per la majoria d'observacions i per tant una modelització satisfactòria.

La voluntat d'homogeneïtzació de paràmetres en el calibratge per tota la xarxa, tot el material rodant té un efecte negatiu sobre els resultats de la modelització de la corba de frenada de les UT114. Tot i així totes les mesures realitzades amb les UT114 han superat el criteri de tolerància fixat en ± 5 segons.

En cas de voler adoptar paràmetres específics per la UT114 es recomana reduir el valor del paràmetre de la frenada per intervals de velocitat per intervals d'entre 30 i 60 km/h.

Personal de conducció

Com s'ha comentat l'agressivitat en la conducció juga un paper clau en l'obtenció d'un bon calibratge. En el present estudi s'ha posat èmfasi sobre la necessitat de calibrar adequadament els paràmetres "Performance" i el "Min. Time hold speed" per tal de poder modelitzar aquest comportament agressiu en la conducció.

Respecte a la modelització del comportament del personal en la conducció es conclou:

- ∴ El valor de "Performance" del 96,8% combinat amb una acceleració màxima d' $1,15 \text{ m/s}^2$ dona uns resultats de la d'acceleració i la corba de velocitat màxima simulada de manera satisfactòria.
- ∴ Per futurs usos de l'eina es recomana establir un valor de "Performance" del 97% amb una acceleració màxima $1,15 \text{ m/s}^2$ i una tolerància de $\pm 8 \text{ s}$.
- ∴ Els valors tan elevats de la "Performance" ($\approx 97\%$) corroboren les hipòtesis inicials sobre el gran rendiment i l'homogeneïtzació del comportament del maquinista front a la conducció. Sens dubte aquest resultat ve condicionat pel fet que FGC s'encarrega de la formació del seu personal de conducció i pel fet que el personal coneix a la perfecció la xarxa.

- ∴ Durant el calibratge de l'eina s'ha posat el focus en la modelització de les situacions on els trens acceleren i seguidament comencen a frenar. La modificació d'aquest paràmetre ("Min. Time hold speed") no té un gran impacte sobre els temps de recorregut, tanmateix sí que presenta diferències respecte a la marxa real en la representació del gràfic espai-velocitat. Per defecte, OpenTrack modelitza aquests comportaments de manera molt agressiva, passant d'acceleració a frenada de forma instantània. No obstant per el cas concret de la línia Barcelona-Vallès es recomana fixar aquest paràmetre ("Min. Time hold speed") en 3s.

Servei

Amb l'anàlisi dels resultats per diferents polítiques de servei s'ha pogut verificar la robustesa del model front a diferents casuístiques d'horari d'exploació.

Com a norma general, els temps de recorregut simulats han entrat dins del criteri de tolerància fixat en $\pm 5s$, a excepció de dos casos concrets:

- ∴ Puntualment, alguna mesura real no ha estat l'òptima per obtenir un marc comparatiu de referència. Aquest és el cas, fonamentalment, de les LTV on les restriccions temporals de velocitat no es corresponen amb les condicions de contorn habituals de la línia.
- ∴ Trams llargs amb velocitats elevades i polítiques de servei semidirectes. En aquests casos (Sarrià – Sant Cugat en sentit ascendent) hi ha una menor presència d'acceleracions i desacceleracions per la qual cosa el factor "Performance" té una major incidència sobre els resultats de temps de recorregut total. En conseqüència, les marxés simulades són més lentes que les marxés reals, i la diferència entre els temps de recorregut simulats i reals és superior a 5 segons (tolerància) però inferior al 5% respecte al temps de recorregut real. Al presentar-se temps de recorregut simulats superior a les mesures reals, es considera que el calibratge està del costat de la seguretat i s'accepten els resultats obtinguts.

L'anàlisi d'aquesta casuística ha mostrat la robustesa del model per la majoria de situacions però també ha posat en relleu un punt feble del mateix (l'impacte de la "Performance" en trams llargs amb velocitats sostingudes). Així doncs, per a futurs usos del calculador de marxés tècniques on es doni aquest cas, es recomana variar el valor de la "Performance". El rang de valors del paràmetre "Performance" recomanat per aquests casos és [97%,98,5%].

Bibliografia

- ACN Sabadell. (27 de 12 de 2017). FGC adjudica la construcció de 15 nous trens per millorar la freqüència de pas a la línia del Vallès. *La Vanguardia*.
- Álvarez, A. G. (2006). *Dinámica de los trenes en alta velocidad*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Arroyo, F. (20 de Juny de 2004). Ferrocarrils de la Generalitat pone en marcha una modalidad de transporte escolar en tren para el Vallès. *El País*, pág.
https://elpais.com/diario/2004/06/20/catalunya/1087693654_850215.html.
- BOE Nº315. (Diciembre de 2004). *Ministerio de la Presidencia, Boletín Oficial*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-21908>
- Borràs, B. (5 de maig de 2018). *trens.cat*. Obtenido de <http://www.trenscat.cat/>
- Cantero, J. (9 de Maig de 2014). *II edición del curso de especialización en: Ingeniería ferroviaria*. (J. C. Matos, Productor) Recuperado el 27 de Maig de 2018, de Camins.cat:
http://www.camins.cat/emailings/Cursos/Curs_ferrovieri_2014/ponencies_web/9.5.14/Explotacion_infra_ferrovieria_Cantero_9.5.14.pdf
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya . (2009). *Pliego de prescripciones técnicas para la construcción y suministro de unidades de tren eléctricas, serie 113, de ancho de vía internacional (1,435 m) para la circulación de la línea Barcelona-Vallès de ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya*.
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (Maig de 2008). Traçat Barcelona-Vallès, perfils longitudinals.
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (Juliol de 2017). *Memòria 2016*. Obtenido de http://www.fgc.cat/wp-content/uploads/2017/09/memoria_2016.pdf
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (2017). *Memòria 2016*.
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (16 de Agost de 2017). Quadres de servei de enclavaments B-V. Barcelona.
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (2018). *Servei per a l'anàlisi de la capacitat de la infraestructura actual de la línia Barcelona-Vallès de Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya*.
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya. (s.f.). Manual Tècnic per al disseny funcional d'enclavaments.
- García-Lomas y Cossío, J. M. (1972). *Tratado de explotación de ferrocarriles*. Madrid: Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- Huerlimann, D., & Andrew, N. (2004). *Railroad simulation using opentrack*. 18/04/2018, de *OpenTrack*. Retrieved from <http://www.opentrack.at/opentrack/downloads/Comprail.2004.pdf>
- Huerlimann, Daniel; Nash, Andrew B. (2017). OpenTrack Manual 1.9.

- López Pita, A. (2006). *Infraestructuras ferroviarias*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- López Pita, A. (2008). *Explotación de líneas de ferrocarril*. Barcelona: Edicions UPC.
- Martínez Sánchez, J. A. (Maig de 2006). *Anàlisi de la xarxa ferroviària de la RMB*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3318;jsessionid=E4FB2ABB5E2952B42483A61C27FFD11E?>
- Salmerón i Bosch, C. (1988). *El Tren del Vallès : història dels ferrocarrils de Barcelona a Sabadell i Terrassa*. Barcelona: Direcció General de Transports.
- Siemens AG. (2011). *Prestaciones y simulaciones del tren, FGC UT113 UT-4 coches*.
- Siemens AG. (2014). *Documento técnico. Prestaciones del tren (3 coches) UT114*.
- TMB. (2018). *Dades bàsiques 2018*. Obtenido de https://www.tmb.cat/documents/20182/94438/dades+viatgers+bus+metro+2018_CA_EN_acc/9a79d163-9d9b-4f53-b212-532e55964c80
- BOE Nº315. (Diciembre de 2004). *Ministerio de la Presidencia, Boletín Oficial*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2004-21908>

Annex 1. Recull dels temps de recorregut reals obtinguts de les circulacions nocturnes.

Es mostra en blau ombrejat els millors temps de recorregut mesurats pel cas en que el tren s'atura en totes les estacions i en gris pel tram PR-GR via 3 que continua cap a Avinguda Tibidabo.

Sentit ascendent.

Data	Dia 1	Dia 1	Dia 1	Dia 2	Dia 2	Dia 3	Dia 3	Dia 3	Dia 4	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 6	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 8	Dia 8
Moviment	3	5	7	2	4	3	5	7	2	4	2	3	5	3	5	7	9	11	10	13
PC (via 1)	----	----	----	sortida	sortida	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----				sortida	
PC (via 2)	sortida		----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	sortida	----				----	
PC (via 3)	----	sortida	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	sortida				----	
PC (via 4)	----	----	----	----	----	sortida	----	----	----	----	----	----	----	----	----				----	
PC (via 5)	----	----	----	----	----	----	sortida	----	----	----	----	----	----	----	----				----	
PR	0:01:51	0:01:51	----	0:01:54	0:01:53	0:01:53	0:01:54	----	----	----	----	----	----	0:01:51	0:01:50				0:01:53	
GR (via 1)	0:01:11	0:01:12	----	----	----	0:01:12	0:01:13	----	----	----	----	----	----	0:01:12	0:01:12				----	
GR (via 3)	----	----	----	0:01:31	0:01:31	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----				0:01:32	
SG	0:00:53		----	----	----	0:00:50	0:00:51	----	----	----	----	----	----	0:00:53					----	
MN	0:00:49	0:01:23	----	----	----	0:00:47	0:00:48	----	----	----	----	----	----	0:00:50	0:01:24				----	
BN	0:00:52		----	----	----		0:00:51	----	----	----	----	----	----	0:00:52					----	
TT	0:00:48		----	----	----	0:01:19		----	----	----	----	----	----	0:00:47					----	
SR (via 1)	0:01:05	0:02:12	sortida	----	----	0:01:04	0:01:33	sortida	----	----	----	sortida	sortida	0:01:05	0:02:05	sortida	sortida	sortida	----	sortida
PF	0:02:56		0:03:01	----	----				----	----	----	0:02:58		0:03:01					----	
VL	0:01:42			----	----			0:04:15	----	----	----		0:04:27	0:01:45				0:04:17	----	
LP	0:01:08		0:02:36	----	----		0:05:03		----	----	----	0:02:34		0:01:06			0:05:06		----	
LF	0:02:58	0:07:55		----	----			0:03:49	----	----	----	0:03:03		0:02:56	0:07:43				----	
VD (via 1)	0:01:38	0:01:44		----	----	0:08:57	0:04:18		sortida	sortida	sortida	0:01:45	0:05:20	0:01:44	0:01:44		0:04:17	0:05:06	----	0:09:14
SC (via 1)	0:01:52	0:01:56	0:05:56	----	----	0:01:41	0:01:41	0:02:47	0:01:37	0:01:40	0:01:36	0:01:42	0:01:38	0:01:44	0:01:39	0:10:03	0:01:48		----	0:01:37

Taula A1.1 Temps de recorregut tècnics pel tram Plaça Catalunya – Sant Cugat, sentit ascendent. Font: FGC.

Data	Dia 4	Dia 4	Dia 4	Dia 8	Dia 8	Dia 8
Moviment	2	4	6	5	7	9
SC (via 1)	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida
MS	0:01:48				0:01:49	
HG	0:01:29	0:03:02			0:01:32	0:02:53
RB	0:01:44	0:01:45	0:04:17	0:04:11	0:01:53	0:01:56
FN	0:04:03		----	----	----	----
TR	0:03:31	0:07:08	----	----	----	----
VP	0:01:56	----	----	----	----	----
EN	0:01:15	----	----	----	----	----
NA (via 1)	0:01:50	----	----	----	----	----

Taula A1.2 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Nacions Unides, sentit ascendent. Font: FGC.

Data	Dia 5	Dia 5	Dia 5	Dia 5	Dia 8
Moviment	2	4	6	8	2
SC (via 1)	sortida	----	----	----	sortida
VO	0:01:47	----	----	----	
SJ	0:01:15	sortida	----	----	0:02:55
BT	0:01:39		sortida	sortida	
UN	0:01:41	0:03:00	0:01:39	0:01:40	0:03:14
SQ	0:03:16	0:03:13			
CF	0:02:00			0:04:58	
PJ	0:01:18	0:03:00	0:05:51	0:01:18	0:05:43
CT	0:01:17	0:01:21	0:01:23	----	----
NO	0:01:03	----	----	----	----
PN (via 1)	0:03:25	----	----	----	----

Taula A1.3 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Parc del Nord, sentit ascendent. Font: FGC.

Data	Dia 2	Dia 2	Dia 8
Moviment	2	4	10
GR (via 3)	sortida	sortida	sortida
PM	0:01:14	0:01:13	0:01:06
PD	0:00:45	0:00:45	0:00:45
EP	0:00:49	0:00:49	0:00:49
TB	0:01:04	0:01:05	0:01:04

Taula A1.4 Temps de recorregut tècnics pel tram Gràcia – Av. Tibidabo, sentit ascendent. Font: FGC.

Sentit descendent.

Data	Dia 1	Dia 1	Dia 1	Dia 2	Dia 2	Dia 3	Dia 3	Dia 3	Dia 4	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 7	Dia 8
Moviment	2	4	6	1	3	2	4	6	5	7	2	4	2	4	6	8	10	12
SC (via 2)	sortida	sortida	sortida	----	----	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida	sortida
VD	0:01:34	0:01:37		----	----	0:01:28	0:01:28		0:01:35	0:01:37	0:01:31	0:01:31	0:01:37	0:01:38		0:01:35	0:01:35	0:01:35
LF	0:01:45	0:01:46		----	----			0:02:41	----	----	0:01:47		0:01:47	0:01:46				
LP	0:02:59		0:05:27	----	----		0:04:17		----	----	0:03:03		0:02:59			0:04:24		
VL	0:01:07			----	----			0:03:44	----	----		0:05:09	0:01:15				0:05:10	
PF	0:01:53		0:02:43	----	----				----	----	0:02:46		0:02:04					
SR (via 2)	0:03:05	0:08:12	0:03:15	----	----	0:09:31	0:05:40	0:04:37	----	----	0:03:09	0:04:52	0:03:06	0:08:20	0:10:42	0:05:40	0:04:40	0:09:52
TT	0:01:05		----	----	----	0:01:03		----	----	----	----	----	0:01:03					
BN	0:00:47		----	----	----		0:01:32	----	----	----	----	----	0:00:48					
MN	0:00:51	0:02:11	----	----	----	0:01:18	0:00:49	----	----	----	----	----	0:00:50	0:02:04				
SG	0:00:56		----	----	----	0:00:57	0:01:03	----	----	----	----	----	0:00:53					
GR (via 2)	0:00:51	0:01:31	----	----	----	0:00:48	0:00:50	----	----	----	----	----	0:00:55	0:01:26				
GR (via 4)	----	----	----	sortida	sortida	----	----	----	----	----	----	----	----	----				
PR	0:01:33	0:01:21	----	0:01:23	0:01:24	0:01:21	0:01:21	----	----	----	----	----	0:01:21	0:01:21				
PC (via 1)	----	----	----	0:02:06	0:02:04	----	----	----	----	----	----	----	----	----				
PC (via 2)	0:02:03	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0:02:09	----				
PC (via 3)	----	0:02:08	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	0:02:14				
PC (via 4)	----	----	----	----	----	0:02:10	----	----	----	----	----	----	----	----				
PC (via 5)	----	----	----	----	----	0:02:12	----	----	----	----	----	----	----	----				

Taula A1.5 Temps de recorregut tècnics pel tram Sant Cugat – Plaça Catalunya, sentit descendent. Font: FGC.

Data	Dia 4	Dia 4	Dia 4
Moviment	3	5	7
NA (via 2)	sortida	----	----
EN	0:01:42	----	----
VP	0:01:17	sortida	----
TR	0:02:00	0:02:06	----
FN	0:03:23		sortida
RB	0:04:07	0:06:59	0:04:01
HG	0:01:43	0:01:48	
MS	0:01:32		
SC (via 2)	0:02:01	0:03:04	0:04:19

Taula A1.6 Temps de recorregut tècnics pel tram Nacions Unides - Sant Cugat, sentit descendent. Font: FGC.

Data	Dia 5	Dia 5	Dia 5	Dia 5	Dia 8
Moviment	3	5	7	9	3
PN (via 2)	sortida	----	----	sortida	----
NO		----	----	0:01:42	----
CT	0:02:16	sortida	sortida	0:01:02	----
PJ	0:01:17	0:01:25	0:01:25	0:01:16	sortida
CF			0:01:20	0:01:21	0:01:20
SQ	0:02:53			0:01:44	
UN	0:03:14	0:05:47	0:04:36	0:03:15	0:04:39
BT		----	----	0:01:41	
SJ	0:02:55	----	----	0:01:34	0:02:57
VO	0:01:34	----	----	0:01:14	0:01:16
SC (via 2)	----	----	----	0:01:56	0:02:06

Taula A1.7 Temps de recorregut tècnics pel tram Parc del Nord - Sant Cugat, sentit descendent. Font: FGC.

Data	Dia 2	Dia 2
Moviment	2	2
TB	sortida	sortida
EP	0:00:58	0:00:58
PD	0:00:46	0:00:46
PM	0:00:45	0:00:45
GR (via 4)	0:01:04	0:01:04

Taula A1.8 Temps de recorregut tècnics pel tram Av. Tibidabo - Gràcia, sentit descendent. Font: FGC.

Annex 2. Resultats del procés iteratiu, temps de recorregut i paràmetres utilitzats.

Paràmetres del calibratge.

		Paràmetre	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5
Infraestructua	Oth.	Adhesion	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)
		Adhesion Tunnel	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)
	Tunnels	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 1	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 2	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 3	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 4	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 5	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Soterrament Sabadell	Tunnel Double, Rough	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth
		Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Soterrament Terrassa	Tunnel Double, Rough	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth

Taula A2.5 Paràmetres del calibratge referents a la infraestructura. Iteracions 0-5. Font: elaboració pròpia.

		Paràmetre	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5
Material Rodant	Trans UT113 & UT114	Performance	100,0%	98,0%	98,0%	98,0%	98,0%	98,0%
		Equation Rolling	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff
		Resist. Factor	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
		Rot Mass Factor	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
		Percentage (correction)	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		Max. Acc	1,1 m/s2	1,1 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2
		Min. Time Hold Speed	0 s	0 s	0 s	0 s	0 s	5s
		Desacceleration Functio	Default	Default	Default	Default	Default	Default
			-1,1 m/s2	-0,9 m/s2	-0,9 m/s2	0-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2
		Desacceleration Prop						
		Correct Deceleration	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Taula A2.6 Paràmetres del calibratge referents al material rodant i conducció. Iteracions 0-5. Font: elaboració pròpia.

		Paràmetre	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
Infraestructua	Oth.	Adhesion	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)
		Adhesion Tunnel	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)	good (125%)
	Tunnels	Soterrament BCN	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 1	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 2	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 3	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 4	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 5	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 1 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Túnel 2 (BT-UN)	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Soterrament Sabadell	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth
		Soterrament Rubí	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough	Tunnel Double, Rough
		Soterrament Terrassa	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth	Tunnel single, Smooth

Taula A2.7 Paràmetres del calibratge referents a la infraestructura. Iteracions 6-10. Font: elaboració pròpia.

		Paràmetre	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
Material Rodant	Trans UT113 & UT114	Performance	98,0%	98,0%	97,0%	96,9%	96,8%
		Equation Rolling	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff	Strahl/Sathunoff
		Resist. Factor	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
		Rot Mass Factor	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
		Percentage (correction)	100%	100%	100%	100%	100%
		Max. Acc	1,15 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2	1,15 m/s2
		Min. Time Hold Speed	4s	3s	3s	3s	3s
		Desacceleration Functio	Default	Default	Default	Default	Default
			0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2	0-50 km/h --> -0,8 m/s2 50-70 km/h --> -0,9 m/s2 70-90 km/h --> -1,1 m/s2
		Desacceleration Prop					
		Correct Deceleration	NO	NO	NO	NO	NO

Taula A2.8 Paràmetres del calibratge referents al material rodant i conducció. Iteracions 6-10. Font: elaboració pròpia.

Sentit ascendent.

Ascendent	TDR Real	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
PC-PR	0:01:53	0:01:45	0:01:50	0:01:49	0:01:49	0:01:49	0:01:51	0:01:51	0:01:51	0:01:52	0:01:52	0:01:51
PR-GR	0:01:11	0:01:07	0:01:09	0:01:09	0:01:09	0:01:09	0:01:09	0:01:09	0:01:09	0:01:10	0:01:10	0:01:11
GR-SG	0:00:50	0:00:50	0:00:52	0:00:52	0:00:52	0:00:52	0:00:54	0:00:54	0:00:54	0:00:53	0:00:53	0:00:54
SG-MN	0:00:47	0:00:47	0:00:49	0:00:49	0:00:49	0:00:49	0:00:50	0:00:50	0:00:50	0:00:51	0:00:51	0:00:51
MN-BN	0:00:51	0:00:47	0:00:50	0:00:49	0:00:49	0:00:49	0:00:50	0:00:50	0:00:50	0:00:51	0:00:51	0:00:51
BN-TT	0:00:48	0:00:45	0:00:46	0:00:46	0:00:46	0:00:46	0:00:47	0:00:47	0:00:47	0:00:47	0:00:47	0:00:48
TT-SR	0:01:04	0:00:59	0:01:02	0:01:02	0:01:02	0:01:02	0:01:03	0:01:03	0:01:03	0:01:03	0:01:04	0:01:03
SR-PF	0:02:56	0:02:53	0:02:58	0:02:58	0:02:58	0:02:58	0:02:59	0:02:59	0:02:59	0:03:00	0:03:00	0:03:01
PF-VL	0:01:42	0:01:41	0:01:44	0:01:43	0:01:43	0:01:43	0:01:45	0:01:45	0:01:45	0:01:46	0:01:46	0:01:47
VL-LP	0:01:08	0:01:00	0:01:03	0:01:03	0:01:03	0:01:02	0:01:04	0:01:04	0:01:04	0:01:04	0:01:04	0:01:04
LP-LF	0:02:58	0:02:48	0:02:52	0:02:52	0:02:52	0:02:52	0:02:53	0:02:53	0:02:53	0:02:54	0:02:55	0:02:56
LF-VD	0:01:38	0:01:33	0:01:37	0:01:37	0:01:36	0:01:37	0:01:38	0:01:38	0:01:38	0:01:39	0:01:39	0:01:38
VD-SC	0:01:36	0:01:25	0:01:29	0:01:28	0:01:28	0:01:28	0:01:29	0:01:29	0:01:29	0:01:30	0:01:29	0:01:31
SC-VO*	0:01:47	0:01:29	0:01:29	0:01:28	0:01:28	0:01:28	0:01:30	0:01:30	0:01:30	0:01:30	0:01:30	0:01:35
VP-SJ	0:01:15	0:01:12	0:01:15	0:01:15	0:01:15	0:01:15	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:17	0:01:17	0:01:17
SJ-BT	0:01:39	0:01:32	0:01:36	0:01:36	0:01:35	0:01:35	0:01:37	0:01:37	0:01:37	0:01:37	0:01:37	0:01:38
BT-UN	0:01:39	0:01:35	0:01:38	0:01:37	0:01:38	0:01:37	0:01:38	0:01:38	0:01:38	0:01:40	0:01:40	0:01:40
UN-SQ	0:03:13	0:03:09	0:03:14	0:03:15	0:03:14	0:03:14	0:03:16	0:03:16	0:03:16	0:03:17	0:03:17	0:03:18
SQ-CF	0:02:00	0:01:53	0:01:56	0:01:55	0:01:56	0:01:56	0:01:57	0:01:57	0:01:57	0:01:57	0:01:58	0:01:58
CF-PJ	0:01:18	0:01:12	0:01:16	0:01:15	0:01:15	0:01:15	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:18	0:01:17	0:01:17
PJ-CT	0:01:17	0:01:11	0:01:15	0:01:15	0:01:14	0:01:14	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:15	0:01:16	0:01:16
CT-NO	0:01:03	0:00:58	0:01:00	0:01:00	0:01:00	0:00:59	0:01:01	0:01:01	0:01:01	0:01:02	0:01:01	0:01:02
SC-MS	0:01:48	0:01:38	0:01:42	0:01:42	0:01:42	0:01:41	0:01:43	0:01:43	0:01:43	0:01:44	0:01:44	0:01:44
MS-HG	0:01:29	0:01:26	0:01:30	0:01:29	0:01:29	0:01:29	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:32
HG-RB	0:01:44	0:01:40	0:01:44	0:01:44	0:01:43	0:01:44	0:01:45	0:01:45	0:01:45	0:01:45	0:01:46	0:01:45
RB-FN	0:04:03	0:03:56	0:04:03	0:04:03	0:04:02	0:04:02	0:04:04	0:04:04	0:04:04	0:04:06	0:04:06	0:04:07
FN-TR	0:03:31	0:03:20	0:03:25	0:03:25	0:03:25	0:03:25	0:03:26	0:03:26	0:03:26	0:03:27	0:03:28	0:03:29
TR-VP	0:01:56	0:01:50	0:01:54	0:01:53	0:01:54	0:01:54	0:01:55	0:01:55	0:01:55	0:01:56	0:01:56	0:01:56
VP-EN	0:01:15	0:01:11	0:01:14	0:01:14	0:01:13	0:01:13	0:01:14	0:01:14	0:01:14	0:01:15	0:01:15	0:01:15
EN-NA	0:01:50	0:01:44	0:01:47	0:01:47	0:01:47	0:01:47	0:01:48	0:01:48	0:01:48	0:01:49	0:01:49	0:01:50

Taula A2.1 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Font: elaboració pròpia.

Ascendent	Temps Real	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
PC-PR	0:01:53	0:01:46	0:01:49	0:01:49	0:01:49	0:01:49	0:01:51	0:01:51	0:01:51	0:01:52	0:01:52	0:01:53
PR-GR	0:01:32	0:01:23	0:01:25	0:01:25	0:01:25	0:01:25	0:01:25	0:01:25	0:01:25	0:01:26	0:01:26	0:01:27
GR-PM	0:01:13	0:01:04	0:01:07	0:01:07	0:01:07	0:01:07	0:01:08	0:01:08	0:01:08	0:01:08	0:01:09	0:01:09
PM-PD	0:00:45	0:00:42	0:00:44	0:00:45	0:00:45	0:00:45	0:00:46	0:00:46	0:00:46	0:00:47	0:00:46	0:00:46
PD-EP	0:00:49	0:00:46	0:00:48	0:00:48	0:00:48	0:00:48	0:00:50	0:00:50	0:00:49	0:00:49	0:00:49	0:00:49
EP-TB	0:01:04	0:00:58	0:00:59	0:01:00	0:01:00	0:01:00	0:01:01	0:01:00	0:01:01	0:01:01	0:01:02	0:01:02

Taula A2.2 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Tram PC-TB. Font: elaboració pròpia.

Temps de recorregut simulat fora de la tolerància de $\pm 5s$.
 * Tram sota l'impacte de una LTV.

Sentit ascendent.

Descendent	Temps Real	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
NA-EN	0:01:42	0:01:36	0:01:40	0:01:39	0:01:39	0:01:39	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:42
EN-VP	0:01:17	0:01:10	0:01:12	0:01:13	0:01:13	0:01:13	0:01:13	0:01:13	0:01:13	0:01:14	0:01:14	0:01:14
VP-TR	0:02:00	0:01:54	0:01:56	0:01:55	0:01:55	0:01:55	0:01:56	0:01:56	0:01:56	0:01:58	0:01:58	0:01:57
TR-FN	0:03:23	0:03:15	0:03:21	0:03:21	0:03:21	0:03:20	0:03:22	0:03:22	0:03:22	0:03:23	0:03:24	0:03:24
FN-RB	0:04:01	0:03:56	0:04:02	0:04:01	0:04:01	0:04:02	0:04:03	0:04:03	0:04:03	0:04:05	0:04:05	0:04:06
RB-HG	0:01:43	0:01:37	0:01:42	0:01:42	0:01:41	0:01:41	0:01:43	0:01:43	0:01:43	0:01:43	0:01:43	0:01:44
HG-MS	0:01:32	0:01:27	0:01:30	0:01:30	0:01:30	0:01:29	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:32	0:01:32	0:01:32
MS-SC	0:02:01	0:01:54	0:01:57	0:01:57	0:01:57	0:01:57	0:01:58	0:01:58	0:01:58	0:01:59	0:01:59	0:01:59
PN-NO	0:01:42	0:01:30	0:01:35	0:01:35	0:01:35	0:01:34	0:01:36	0:01:36	0:01:36	0:01:37	0:01:37	0:01:37
NO-CT	0:00:56	0:00:57	0:00:59	0:00:59	0:00:59	0:00:59	0:01:00	0:01:00	0:01:00	0:01:00	0:01:00	0:01:00
CT-PJ	0:01:16	0:01:11	0:01:15	0:01:14	0:01:14	0:01:14	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:16
PJ-CF	0:01:20	0:01:14	0:01:17	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:17	0:01:17	0:01:17	0:01:18	0:01:18	0:01:18
CF-SQ	0:01:44	0:01:43	0:01:47	0:01:47	0:01:46	0:01:46	0:01:48	0:01:48	0:01:48	0:01:48	0:01:49	0:01:49
SQ-UN	0:03:14	0:03:09	0:03:14	0:03:14	0:03:14	0:03:14	0:03:15	0:03:15	0:03:15	0:03:17	0:03:17	0:03:17
UN-BT	0:01:41	0:01:37	0:01:40	0:01:39	0:01:40	0:01:40	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:42	0:01:41	0:01:42
BT-SJ	0:01:34	0:01:33	0:01:36	0:01:36	0:01:36	0:01:35	0:01:37	0:01:37	0:01:37	0:01:38	0:01:38	0:01:38
SJ-VP	0:01:14	0:01:11	0:01:15	0:01:14	0:01:14	0:01:15	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:16	0:01:17	0:01:16
VP-SC	0:01:56	0:01:46	0:01:50	0:01:49	0:01:49	0:01:48	0:01:50	0:01:50	0:01:50	0:01:51	0:01:51	0:01:51
SC-VD	0:01:28	0:01:26	0:01:30	0:01:29	0:01:29	0:01:29	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:31	0:01:31
VD-LF	0:01:45	0:01:37	0:01:40	0:01:41	0:01:40	0:01:40	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:42	0:01:42	0:01:43
LF-LP	0:02:59	0:02:51	0:02:56	0:02:55	0:02:56	0:02:56	0:02:57	0:02:57	0:02:57	0:02:58	0:02:58	0:02:59
LP-VL	0:01:07	0:01:05	0:01:07	0:01:07	0:01:06	0:01:06	0:01:07	0:01:07	0:01:07	0:01:08	0:01:08	0:01:08
VL-PF*	0:01:53	0:01:37	0:01:40	0:01:40	0:01:40	0:01:39	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:41	0:01:42	0:01:42
PF-SR	0:03:05	0:03:03	0:03:08	0:03:07	0:03:07	0:03:08	0:03:08	0:03:08	0:03:08	0:03:10	0:03:09	0:03:10
SR-TT	0:01:03	0:00:59	0:01:01	0:01:01	0:01:01	0:01:01	0:01:02	0:01:02	0:01:02	0:01:02	0:01:02	0:01:02
TT-BN	0:00:47	0:00:44	0:00:46	0:00:46	0:00:46	0:00:46	0:00:47	0:00:47	0:00:47	0:00:48	0:00:48	0:00:48
BN-MN	0:00:49	0:00:47	0:00:50	0:00:49	0:00:49	0:00:49	0:00:51	0:00:50	0:00:50	0:00:50	0:00:50	0:00:51
MN-SG	0:00:56	0:00:49	0:00:51	0:00:51	0:00:51	0:00:51	0:00:52	0:00:53	0:00:53	0:00:53	0:00:53	0:00:53
SG-GR	0:00:48	0:00:49	0:00:51	0:00:50	0:00:50	0:00:50	0:00:51	0:00:51	0:00:51	0:00:52	0:00:52	0:00:51
GR-PR	0:01:21	0:01:15	0:01:18	0:01:18	0:01:18	0:01:18	0:01:20	0:01:19	0:01:19	0:01:19	0:01:20	0:01:17
PR-PC	0:02:03	0:01:57	0:02:00	0:02:00	0:02:00	0:02:00	0:02:00	0:02:01	0:02:01	0:02:02	0:02:01	0:02:03

Taula A2.3 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit ascendent. Font: elaboració pròpia.

Descendent	Temps Real	Iteració 0	Iteració 1	Iteració 2	Iteració 3	Iteració 4	Iteració 5	Iteració 6	Iteració 7	Iteració 8	Iteració 9	Iteració 10
TB-EP	0:00:58	0:00:52	0:00:53	0:00:53	0:00:53	0:00:53	0:00:55	0:00:55	0:00:55	0:00:55	0:00:55	0:00:55
EP-PD	0:00:46	0:00:41	0:00:44	0:00:44	0:00:44	0:00:44	0:00:45	0:00:45	0:00:45	0:00:45	0:00:45	0:00:45
PD-PM	0:00:45	0:00:39	0:00:42	0:00:42	0:00:42	0:00:42	0:00:43	0:00:43	0:00:43	0:00:44	0:00:44	0:00:44
PM-GR	0:01:04	0:00:55	0:00:58	0:00:58	0:00:58	0:00:58	0:00:59	0:00:59	0:00:59	0:00:59	0:00:59	0:00:59
GR-PR	0:01:23	0:01:16	0:01:18	0:01:19	0:01:19	0:01:19	0:01:19	0:01:19	0:01:19	0:01:20	0:01:20	0:01:20
PR-PC	0:02:04	0:01:58	0:02:02	0:02:02	0:02:02	0:02:02	0:02:03	0:02:03	0:02:03	0:02:04	0:02:04	0:02:05

Taula A2.4 Temps de recorregut per les iteracions realitzades en sentit descendent. Tram PC-TB. Font: elaboració pròpia.

Temps de recorregut simulat fora de la tolerància de $\pm 5s$.
 * Tram sota l'impacte de una LTV.

